



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILLE MÄKI

TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER -TEKNIIKAN KÄYTTÖ TIE-
RAKENTEIDEN DIAGNOSTIIKASSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 9.11.2016

TIIVISTELMÄ

VILLE MÄKI: Traffic Speed Deflectometer -tekniikan käyttö tierakenteiden diagnostiikassa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 120 sivua, 3 liitesivua

Toukokuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja

Avainsanat: Traffic Speed Deflectometer, TSD, taipumamittaus

Suomessa tienpidon niukkeneva rahoitus on johtanut tilanteeseen, jossa korjausvelkaa syntyy jatkuvasti lisää. Saman aikaisesti kuljetusalan kustannuspaineet ajavat enenevässä määrin kohti raskaampia kuljetusyksiköitä, jolloin tiestöön kohdistuva rasitus kasvaa. Haasteisiin vastaaminen ajaa tehostamaan ja kohdentamaan resurssien käyttöä entistä tarkemmin. Päätöksenteon tueksi tarvitaan tietoa teiden rakenteellisesta kunnosta. Tässä merkittävässä roolissa ovat uudentyyppiset menetelmät, kuten jatkuvaa taipumaprofiilia mittaava Traffic Speed Deflectometer (TSD).

TSD on melko uusi, mutta maailmalla yleistynyt tierakenteen mekaanista kuormitusvastetta mittaava laite. Mittauksen tuloksena saadaan vakiintuneen pudotuspainolaitteen (PPL) pistemäisesti mittaamia tierakenteen taipumia vastaavaa taipumatietoa, mutta jatkuvana läpi mitatun tiejakson. Lisäksi TSD toimii liikennevirran nopeudella, joten se mahdollistaa paitsi tarkan niin myös tehokkaan tiedonkeruun tieverkolta. Suomessa ensimmäiset laajemmat TSD-mittaukset on tehty kesällä 2015 osana PEHKO-projektia.

Tässä työssä perehdyttiin sekä TSD:hen menetelmänä että sen tuottamiin tuloksiin. Tärkeää oli myös arvioida TSD:n käyttökelpoisuutta niin suomalaisen tiestön diagnostiikassa kuin kunnostussuunnittelussakin.

Työssä hyödynnettiin kesän 2015 TSD-tulosten lisäksi samoilta teiltä kerättyä muutakin laajaa tietoaaineistoa. Näin päästiin käsiksi monenlaisiin syy-seuraussuhteisiin. TSD-taipumien ja niistä laskettujen tunnuslukujen havaittiin korreloivan hyvin tiestöllä todettujen vaurioiden kanssa. Tärkeää oli tehdä myös vertailevaa tutkimusta PPL-tulosten kanssa. Vertailua hankaloittivat paikoitellen erittäin korkeiksi nousseet mittauslämpötilat, joiden vaikutusta vakiintuneet lämpötilakorjausmenetelmät eivät kyenneet kumoamaan. Tulosten perusteella päädyttiinkin suosittelemaan suomalaisten tierakenteiden taipumamittauksen rajaamista lämpötilan vaihteluvälille +5 ... +25 °C.

Myös oikein asennettujen teräsverkkojen merkitys pohjamaan kantavuuspuutteista kärsivien jaksojen parantamisessa kävi tuloksista selvästi ilmi. Kantavuuslaskentaan liittyen puolestaan havaittiin vanhan suomalaisen E2-moduulin korreloivan varsin hyvin Ode-markin menetelmällä lasketun tierakenteen lähtökantavuuden kanssa.

ABSTRACT

VILLE MÄKI: The Use of Traffic Speed Deflectometer in Diagnostics of Road Structures

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 120 pages, 3 Appendix pages

May 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Civil and Infrastructure Engineering

Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: Traffic Speed Deflectometer, TSD, deflection measurement

The decline in funding to the Finnish road network added to heavier haulage vehicles is causing increasing deterioration of road structures. This development forces Finnish road authorities to enhance the productivity of road maintenance and management, which requires information about the structural condition of roads. It can be done effectively only with newer methods such as the Traffic Speed Deflectometer (TSD).

TSD is a relatively new concept for measuring the pavement response to heavy traffic. It provides the user with pavement deflection data similar to traditional stationary Falling Weight Deflectometer (FWD). Only the TSD can gather data while travelling at normal traffic speed. In addition, the provided deflection profile is continuous, so the method is both accurate and effective. The first large-scale TSD measurements were conducted in Finland in the summer of 2015.

The purpose of this thesis was to have a look at the TSD-method and the results gathered in the measurements of Finnish roads as part of PEHKO-project. Other goal was to assess how useable the method is in the diagnostics and maintenance planning of road structures.

This study utilized integrated analyses of multiple data sources. Realization was that TSD-deflections and deflection-based parameters correlated well with the structural damages that were seen on the roads. Comparison of TSD and FWD data was another important theme on the study. By accident the measuring conditions revealed a problem regarding the temperature correction of deflections. Thus it is recommended to delimit the suitable temperature range for Finnish pavements from +5 to +25 °C.

Other findings were that steel nets proved to be very recommendable way of reinforcing road sections that suffer from deformations related to weak subgrade. Also the values of traditional Finnish E2-modulus seemed to correlate well with the Odemark bearing capacity.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on saanut alkunsa ajatuksen tasolla jo loppuvuonna 2015, joten varsin pitkstä prosessista on ollut kyse. Työ on tehty Roadscanners Oy:n tilaamana ja työn tekemisen yhteydessä minulle on avautunut mahdollisuus tutustua monipuolisesti tierakenteiden diagnostiikan ”tuotantoketjuun” aina väylämittauksista mittausaineiston analyysiin ja tulkintaan saakka. Prosessi on ollut monella tavoin kasvattava, toisinaan haastava, mutta lopulta kuitenkin äärimmäisen palkitseva.

Haluan kiittää työn tarkastajaa professori Pauli Kolisojaa hänen projektiin uhraamastaan ajasta ja lukuisista neuvoista. Niin ikään haluan osoittaa suuret kiitokset työtä Roadscannersilla ohjanneelle toimitusjohtaja Timo Saarenkedolle sekä muille työhön sen eri vaiheissa osallistuneille niin täällä Tampereen toimistolla kuin Rovaniemelläkin. Lisäksi kiitoksen ansaitsevat kaikki työtoverit, on ollut mukavaa olla osa Roadscannersin porukkaa! Kiitos (ja anteeksi) myös kaikille läheisille, jotka ovat valaneet uskoa ja kannustaneet matkan varrella eteenpäin.

Tampereella, 17.5.2017

Ville Mäki

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	LIIKENNERASITUKSEN VAIKUTUS TIERAKENTEESEEN	3
2.1	Tierakenteen toiminta liikennekuormituksen alaisena	3
2.2	Tierakenteen vaurioituminen	4
3.	TIERAKENTEEN TAIPUMAMITTAUKSET	10
3.1	PPL-mittauksen periaate	10
3.2	TSD-mittalaitteisto ja mittauksen periaate	12
3.3	Taipumamittausaineiston lämpötilakorjaus	19
3.4	Taipumatuloksista laskettavat tierakenteen kuntoparametrit	21
3.5	TSD- ja PPL-menetelmien käytettävyys	26
4.	TUTKIMUSKOHTEET	30
4.1	PEHKO-projektin pilottikohteet	30
4.1.1	Keski-Suomi	31
4.1.2	Lappi	32
4.2	PEHKO-projektissa hyödynnetyt tutkimusmenetelmät	33
5.	TSD-AINEISTON ANALYYSI	36
5.1	Taipuma	36
5.1.1	Taipumamuoto	36
5.1.2	Taipumanopeus ja -aika	48
5.1.3	TSD-taipumatulosten epäjohtonmukaisuudet	53
5.2	Muu TSD:n rekisteröimä tieto	55
5.3	TSD-laatuparametrien arviointi	57
6.	TAIPUMAMITTAUSAINOSTA LASKETTAVIEN TIERAKENTEEN KUNTOPARAMETRIEN ANALYYSI	62
6.1	Taipumasuppiloindeksit PEHKO-kohteilla	62
6.2	TSD- ja PPL-tulosten vertailu tutkituilla tieosilla	70
6.2.1	Havaintoja PEHKO-aineiston analyysistä	70
6.2.2	Aiemmat havainnot suomalaiselta tiestöltä	72
6.2.3	TSD- ja PPL-taipumien eroja selittävät tekijät	74
6.2.4	Johtopäätöksiä vertailtujen menetelmien korrelaatiosta	83
7.	TIETOAINESTOJEN INTEGROITU ANALYYSI	86
7.1	Kosteuden näkyminen TSD-tuloksissa	86
7.2	Teräsverkot	90
8.	TSD:N KEHITTÄMISTARPEET	95
8.1	Lämpötilakorjauksen toimivuus	95
8.2	Muut mittaustuloksiin vaikuttavat tekijät	97
9.	KANTAVUUSLASKENTA TSD-TAIPUMISTA	99
9.1	Rakennekerrosmoduulien laskenta	99
9.2	Lähtökantavuuden määrittäminen	106
10.	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	115
	LÄHTEET	118

LIITE A: TSD:N JA PPL:N TILASTOLLINEN VERTAILU

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AB	asfalttibetoni
BCI	Base Curvature Index. Taipumamuotoparametri, joka kuvaa tierakenteen kykyä jakaa kuormituksia erityisesti pehmeillä pohjamailla. Käytetään arvioitaessa pohjamaan deformaation riskiä
FWD	Falling Weight Deflectometer, ks. PPL
GPS	Global Positioning System, satelliittipaikannusjärjestelmä
IBDiM	Puolan tie- ja siltatutkimusinstituutti
IMU	Inertial Measurement Unit, inertiaaliyksikkö. Käytetään parantamassa GPS-paikannuksen tarkkuutta
IRI	International Roughness Index, tien pituussuuntaista epätasaisuutta kuvaava indeksi
PAB	pehmeä asfalttibetoni
PEHKO	Päällysteiden ennakoivan hoidon ja kunnostuksen ohjelmointi -projekti (2015 – 2025)
PPL	pudotuspainolaite, paikaltaan toimiva tierakenteen mekaanisen kuormitusvasteen mittalaite
PTM	palvelutasomittaus
RDSV	Road Doctor Survey Van, Roadscanners Oy:n kehittämä väylien kuntomittauksiin tarkoitettu ajoneuvo
SANRAL	Etelä-Afrikan kansallinen tieviranomaisen
SCI	engl. Surface Curvature Index, pintakantavuusindeksi. Kuvaa päällysrakenteen yläosan deformaation riskiä
SMA	kivimastiksiasfaltti
TPPT	Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (1994 – 2001)
TSD	Traffic Speed Deflectometer. Jatkuva toiminen liikennevirran nopeudella etenevä tierakenteen mekaanisen kuormitusvasteen mittalaite
a	kuormituslevyn halkaisija
AREA	taipumamuotoparametri
d_r	taipuma etäisyydellä r kuormituspisteestä, erit. d_0 = rakenteen maksimitaipuma
$d_{r,T}$	taipuma etäisyydellä r kuormituspisteestä lämpötilassa T
F_1, F_2	rakenteen eri osia kuvaavat taipumamuotoparametrit
E	jäykkyysmoduuli, erit. $E_1 \dots E_n$ = rakennekerrosmoduulit kerroksille 1... n tien pinnasta lukien
E_r	dielektrisyys
h	päällystepaksuus; jänneväli
k	taipuman lämpötilakorjauskerroin
T	(päällysteen) lämpötila
ϵ_a	päällysteen alapinnan venymä
ϵ_{a10}	päällysteen alapinnan lämpötilakorjattu venymä
ϵ_u	pohjamaan ja alusrakenteen moduuli
σ_0	kuorma

1. JOHDANTO

Raskaan liikenteen tierakenteeseen kohdistaman kuormituksen rakenteessa ja pohjamaassa synnyttämää mekaanista vastetta on perinteisesti tutkittu pudotuspainolaitemittauksella (PPL), joka tuottaa tietoa tierakenteen pinnan pystysuuntaisista siirtymistä eli taipumasta. Taipuman suuruuden, taipumamuodon ja taipumista johdettujen rakenteen mittaushetkistä tilaa kuvaavien parametrien avulla voidaan varsin luotettavasti arvioida tierakenteen jäykkyysominaisuuksia ja kuormituskestävyyttä, tien rakenteellista kuntoa ja rakenteen eri osien vaurioitumisriskiä.

PPL-mittaukseen liittyy kuitenkin rajoitteita paitsi menetelmän tehokkuuteen, niin myös mittaamisen turvallisuuteen liittyen. PPL-mittauksia onkin tyypillisesti kannattavaa teettää vain projektikohtaisesti osana lähtötiedonhankintaa, vaikka taipumamittausten perusteella saatava tieto olisi merkittävässä asemassa aina verkostotasolla asti niin tiestön rakenteellisen kunnon hallinnassa kuin tienpidon resurssien kohdentamisessakin. Näin ollen markkinoilla on tilausta pudotuspainolaitetta tehokkaammille, mutta kuitenkin PPL-tulosten kanssa vertailukelpoista tietoa tuottaville menetelmille.

Maailmalla on viime vuosien aikana kehitetty erilaisia jatkuvatoimisia, liikennevirran nopeudella eteneviä taipumamittauslaitteita, joiden avulla saadaan kerättyä pistemäisten PPL-tulosten kanssa korreloivaa, mutta käytännössä jatkuvaa taipumatietoa. Jatkuvatoimisista taipumamittauslaitteista pisimmälle on tuotteistettu tanskalaisen Greenwood Engineering A/S:n Traffic Speed Deflectometer (TSD). TSD on kaupallisessa käytössä suhteellisen uusi: ensimmäinen laitteisto on otettu käyttöön Tanskassa vuonna 2005. Vuoden 2015 loppuun mennessä TSD-mittauslaitteistoja on myyty tuotantokäyttöön eri puolille maailmaa yhteensä kahdeksan kappaletta, viimeisin Australiaan.

Tässä työssä tarkasteltavat suomalaisten teiden TSD-taipumat on mitattu Roadscanners Oy:n tilaamina kesällä 2015. Mittaukset sijoittuvat Keski-Suomen ja lounaisen Lapin alueille ja ne on tehty osana Liikenneviraston, Keski-Suomen sekä Lapin ELY-keskusten ja Roadscanners Oy:n yhteistä ”Päällysteiden ennakoivan hoidon ja kunnostuksen ohjelmointi” -projektia (PEHKO), jonka ajatuksena on kunnossapidon ja hoidon optimoinnin sekä uusimpien teknologioiden avulla kohdentaa tienpidon rahoitus toimenpiteisiin, joilla tieverkon kuntoa voidaan ylläpitää tai jopa parantaa entistä pienemmin resurssein.

Ensimmäisen kerran TSD-mittauksia on tehty Suomen tiestöllä jo kesällä 2013, tuolloin Destia Oy:n tilaamana. Mittaustyön on sekä vuosina 2013 että 2015 tehnyt Puolan tie- ja siltatutkimuslaitos (IBDiM) operoimallaan TSD-mittausajoneuvolla. Mittausten välillä kuluneiden kahden vuoden aikana TSD-tekniikan kehitys on mennyt merkittävästi eteenpäin ja IBDiM:n mittalaitteistoa on päivitetty. Kesällä 2015 käytössä oli uusin markkinoilla oleva TSD-versio.

Tämän työn tarkoituksena on luoda laaja katsaus TSD-tekniikkaan ja sen suomiin mahdollisuuksiin erityisesti suomalaisten tierakenteiden diagnostiikassa, tieverkon kunnan monitoroinnissa ja vaurioitumisen ennakkoinnissa, sekä selvittää menetelmän soveltuvuutta suunnittelutyön välineeksi. Tavoitteena on myös etsiä uusia ja käyttökelpoisia TSD-tuloksiin perustuvia tierakenteen kuntoparametreja. Lisäksi TSD-menetelmällä saatuja tuloksia verrataan vakiintuneen PPL-mittauksen samoilta teiltä tuottamiin taipumiin.

Tässä työssä hyödynnetään PEHKO-projektissa kesällä 2015 kerättyä varsin laajaa TSD-taipuma-aineistoa, samoilta teiltä Roadscanners Oy:n omalla Road Doctor Survey Vanilla (RDSV) kerättyä mittaustietoa sekä ELY-keskusten toimittamaa muuta aineistoa esimerkiksi väylien kunnostushistoriasta. Avainasemassa tässä työssä on mahdollisuus näiden tietoaaineistojen integroituun analyysiin, joka tapahtuu Road Doctor -ohjelmistolla. Saatuja tuloksia peilataan myös aikaisempiin Pertti Virtalan (2016) raportoiimiin kokemuksiin suomalaisten teiden kesän 2013 TSD-mittauksista. Kaikilta osin havainnot eivät ole enää ajankohtaisia, koska kyseessä on jatkuvan kehitystyön kohteena oleva menetelmä.

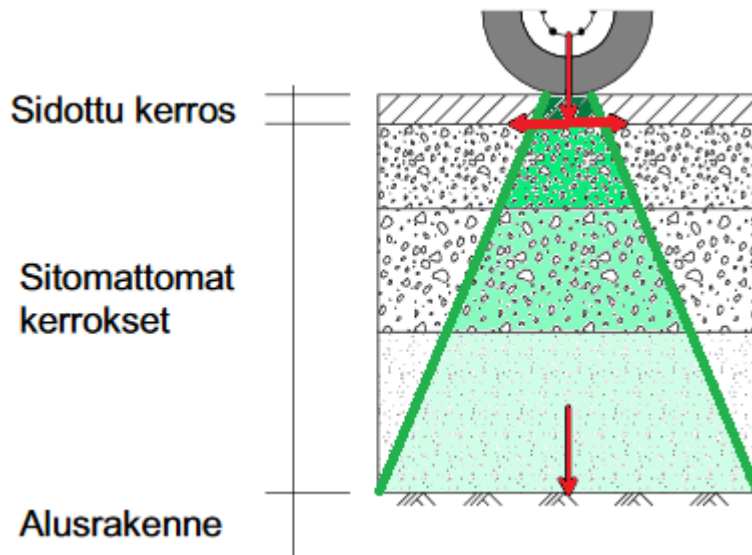
Tosiasia on, että kaikkien uusien menetelmien kohdalla ilmenee alkuvaiheessa jonkin verran epävarmuustekijöitä, eikä TSD ole tässä suhteessa poikkeus. Tekniikan soveltuvuutta eri tarkoituksiin pyritään tässä työssä arvioimaan kriittisesti, mutta kuitenkin ratkaisuhakuisesti

2. LIIKENNERASITUKSEN VAIKUTUS TIERAKENTEeseen

2.1 Tierakenteen toiminta liikennekuormituksen alaisena

Valtaosa tierakenteen vaurioitumisen kannalta kriittisestä liikennekuormituksesta on raskaan liikenteen aiheuttamaa. Henkilöautoliikenteen vaikutus rajoittuu pääosin päällysteen talviseen nastarengaskulumiseen. Uudet entistä raskaammat rekat ja siirtyminen paripyöristä kapeampiin yksittäispyöriin kasvattavat tierakenteiden kuormitusta entisestään. Samalla korotetun kokonaismassan jakaminen entistä useamman akselin kannettavaksi lisää rakenteeseen kohdistuvien peräkkäisten kuormituspulssien lukumäärää ja vähentää rakenteen palautumisaikaa.

Pyöräkuorman alla päällystelaatta taipuu ja sen alapuolisiin rakennekerroksiin syntyy pystysuuntainen puristusjännitys. Samalla taipuvaan päällystelaattaan syntyy vaakasuuntaisia veto- ja puristusvoimia, joista keskeisin on päällysteen alapinnan vetojännitys, joka aiheuttaa päällysteen venymää (Belt et al. 2006, s. 10) (Kuva 1) ja altistaa toistuessaan päällystettä alapinnasta alkavalle halkeilulle. Kuvan tilanteesta poiketen päällysteen alapinnan vetojännitys on todellisuudessa suurimmillaan tien poikkisuunnassa. Vetojännityksiä syntyy myös päällysteen pintaan kuormittavan renkaan sivuille.



Kuva 1: Liikennesäätöjen tierakenteeseen aiheuttamat merkittävimmät pysty- ja vaakakuormitukset sekä pyöräkuorman jakautuminen rakenteessa (muokattu Belt et al 2002, s. 24).

Tien kerroksellisen rakenteen tarkoitus on jakaa liikennekuormista aiheutuvat pystysuuntaiset kuormat alusrakenteen tai pohjamaan sietämälle tasolle siten, ettei päällysrakenteen alla tapahdu deformaatioita. Samalla rakennetta mitoitettaessa on huolehdittava, ettei

tierakenteen alapuolisissa kerroksissa synny rakenteen omasta painosta johtuvia haitallisia painumia, eikä alusrakenteen tai pohjamaan stabiliteetti ylitä. Luonnollisesti myös päällysrakenteen tulee olla riittävän jäykkä kestääkseen toistuvia liikenteen aiheuttamia kuormitussyklejä sekä ilmastorasitusta ennen aikaisesti vaurioitumatta sekä muotoaan tai lujuuttaan haitallisesti muuttamatta.

Tavoitteisiin päästään riittävillä rakennekerrosten paksuuksilla ja oikeilla materiaalinnoilla. Rakenteen oikean mitoittamisen lisäksi myös riittävä ja oikein ohjelmoitu käytönaikainen hoito ja ylläpito ovat avainasemassa rakenteen pitkäaikaiskestävyyden turvaamiseksi, mikä on osoitettu esimerkiksi EU:n rahoittaman ROADDEX-projektin yhteydessä (www.roadex.org). ROADDEX-projektin kokemusten käytännön pilotointi on kannattavana ajatuksena myös PEHKO-projektissa, jonka aineistoja tämä työ hyödyntää.

Tierakenteet voidaan karkeasti jakaa kahteen kategoriaan: paksupäällysteisiin teihin, jotka tyypillisesti ovat verkon vilkkaasti liikennöityjä valta-, kanta- tai vilkkaimpia seututiekohteita, sekä ohutpäällysteisiin teihin, jotka ovat alemman tieverkon vähäliikenteisiä väyliä. Näiden rakenteellinen toiminta on hieman erilainen. Paksupäällysteisillä teillä valtaosa koko rakenteen kantokyvystä on lähtöisin päällystelaatan jäykkyydestä, kun taas ohutpäällysteisillä teillä rakenteen kokonaisjäykkyys riippuu etupäässä sitomattomien kerrosten ominaisuuksista (Belt et al 2002, s. 24-26; Spoof & Pihlajamäki 2001, s. 6).

Suomen tiestölle tunnusomaista ovat pääsääntöisesti erittäin ohuet päällystepaksuudet. Koska lisäksi sideaineina käytetään pakkaskestävyyden asettamien vaatimusten vuoksi pehmeitä bitumilaatuja, ovat suomalaisten teiden rakenteet kansainvälisesti verraten hyvin taipuisia.

2.2 Tierakenteen vaurioituminen

Tierakenteen vaurioitumismekanismit voidaan jakaa karkeasti viiteen luokkaan syntytapaansa perusteella. Vaurioitumisen taustalla voivat olla päällysteen väsyminen, rakenteen tai pohjamaan pysyvät muodonmuutokset, routa ja muut kosteuteen liittyvät tekijät, geotekniset ongelmat tai virheet joko suunnittelu- tai rakennusvaiheessa (Varin & Saarenketo 2014, Herronen et al. 2015). Tyypillisesti nämä mekanismit vaikuttavat yhdenaikaisesti ja tierakenteen lopullinen vaurioituminen on useamman tekijän summa.

Kuten todettua, valtaosa tiestön vaurioista on raskaan liikenteen toistuvien tiehen kohdistamien kuormitusten aikaansaamaa. Logistiikka-alan kilpailukyyn nimissä on Suomen tieliikenteessä päädytty sallimaan kokonaismassaltaan aiempaa suurempia tavarankuljetusajoneuvoja ja ajoneuvoyhdistelmiä, jotka altistavat tierakenteita entistä suuremmille rasituksille. Vielä kasvavaa kokonaismassaakin suurempi tierakennetta kuormittava vaikutus on havaittu olevan raskaan kaluston rengastuksella: viime vuosina käytössä yleistyneellä kapealla yksittäispyörällä on Liikenneviraston tilaaman tuoreen Massat ja mitat-projektin yhteydessä tehtyjen suomalaisten koekohteiden tutkimuksissa todettu samalla 10 tonnin akselimassalla olevan jopa 3,9-kertainen kuormitusvaikutus paripyörään ver-

rattuna (Saarenketo et al 2014). Yksittäispyörällä ja lisäksi erityisesti sen korkealla rengaspaineella on myös ROADEX-tutkimuksissa havaittu selvä yhteys tyypin 1 urautumisen (Kuva 3) sekä päällysteen väsymisen kanssa (Varin & Saarenketo 2014).

Päällysteen väsyminen

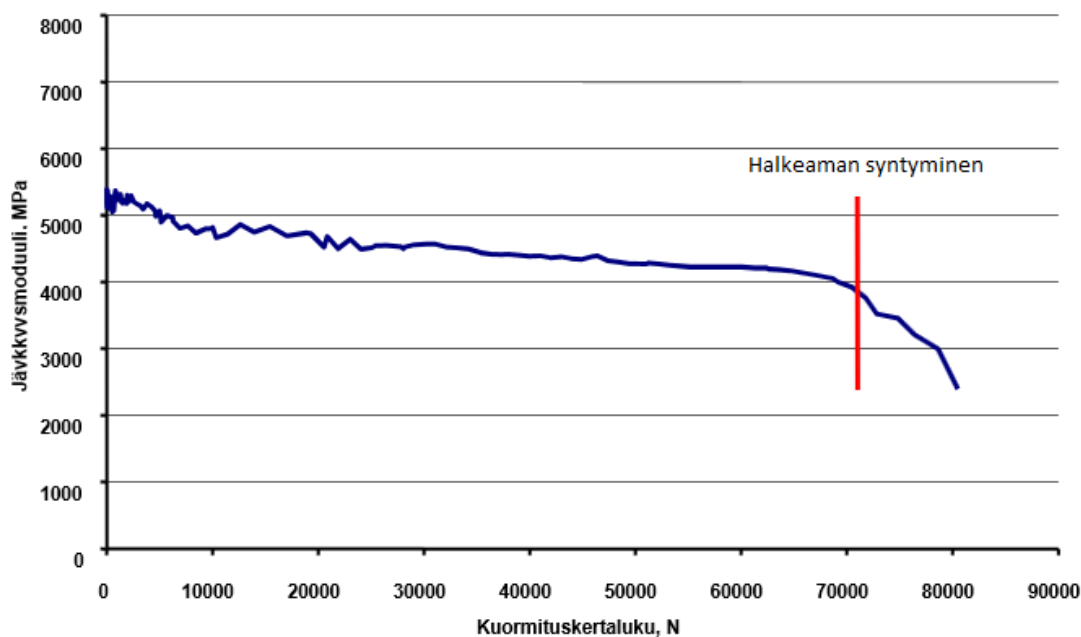
Väsymisvaurioituminen on hallitseva vaurioitumismekanismi etenkin paksupäällysteillä teillä. Se on seurausta toistuvien raskaiden akselien ylityskertojen päällystelaattaan aiheuttamista vetojännityksiä aikaansaavista taivutussykleistä ja niiden aikaansaamista muodonmuutoksista. Toistuessaan vetomuodonmuutokset johtavat päällysteen venymän kasvamiseen, väsymiseen ja edelleen väsymisvaurioiden syntymiseen.

Käytännössä väsymisvaurioitumisen aiheuttaa päällysteen bitumisen sideaineen murtolujuuden ja -venymän aleneminen kuormitus syklien toistumisen myötä. Vaurioiden syntymistä nopeuttaa sideaineen ikääntyminen, jonka myötä päällysteen deformaatiokestävyys alenee. Väsymisvaurioitumisen nopeus riippuu toisaalta tierakenteen ominaisuuksista ja toisaalta kuormituksesta, jolle rakenne altistuu. Vaikuttavia tekijöitä rakenteen osalta ovat päällystepaksuus sekä pitkälti sideaineen ominaisuuksista riippuvat päällystelaatan jäykkyys ja muodonmuutoskestävyys. Kuormituksen kannalta olennaista on kuormitus syklien lukumäärä ja kuormittavan voiman suuruus.

Väsymisvaurioituminen alkaa päällystelaatan alapinnan pituushalkeiluna ajouran pohjan kohdalla, jossa liikennekuorman aiheuttama vetojännitys on suurin. Halkeama etenee uusien jännityssyklien myötä ylöspäin ja lopulta lävistää koko päällystelaatan. Käytetystä rengastyypistä ja ilmanpaineesta riippuen vetojännitykset voivat olla merkittäviä myös päällysteen pinnassa renkaan sivuilla, mikä johtaa ”top-down cracking” -ilmiöön, jossa pituushalkeama saa alkunsa päällysteen pinnassa ajouran reunoilla.

Toistuvien kuormitus syklien myötä tapahtuvaa päällysteen jäykkyysmoduulin alenemista on mallinnettu asfaltin väsytykskoeksessa (Kuva 2). Kuvasta havaitaan, kuinka päällysteen lävistävän halkeaman synnyttyä jännitysten jakautuminen päällystelaatassa muuttuu ja päällysteen jäykkyys alenee nopeasti. Käytännössä päällysteen pituushalkeamat alkavat laajentua aina verkkohalkeiluksi ja reikiintymiseksi saakka. Halkeilu vaikuttaa myös päällystelaatan toimintaan pystykuormia jakavana elementtinä, minkä vuoksi päällysteen alapuolisiin rakennekerroksiin syntyy suuria pystysuuntaisia kuormituspiikkejä, jotka voivat johtaa materiaalin hienonemiseen tai siirtymiin sitomattomissa rakennekerroksissa ja sitä kautta muun tyyppisten vaurioiden syntymiseen.

Väsyminen on ilmiönä monimutkainen ja se saattaa ilmetä rakenteessa halkeilun lisäksi myös urautumisena. Niinpä ilmiön tunnistaminen pelkästään vaurioiden perusteella ei ole yksiselitteistä, varsinkaan kun tyypillisesti useampi vaurioitumismekanismi vaikuttaa rakenteessa samanaikaisesti. Väsymistä ja sitä seuraavaa jäykkyyden alentumista tapahtuu kuitenkin vain ajourien kohdalla. Niinpä päällysteessä on tapahtunut väsymistä, mikäli urasta ja uran sivusta mitatuissa tien pinnan taipumissa on eroa.



Kuva 2: Päällysteen jäykkyyden kehittyminen väsytykskokeen aikana (muokattu: Spoof & Pihlajamäki 2001, s. 5)

Pysyvät muodonmuutokset

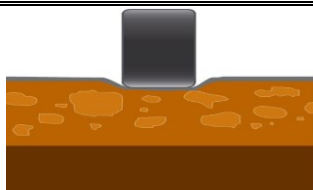
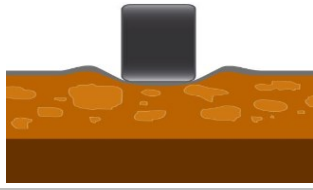
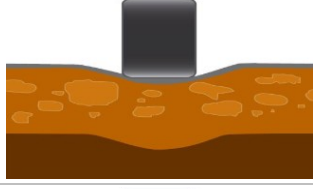
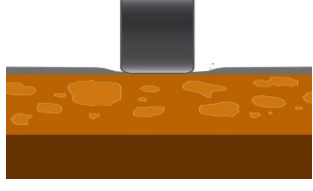
Ohutpäällysteisillä teillä sitomattomien kerrosten ominaisuudet korostuvat verrattuna päällysteen ominaisuuksiin, koska ohuen ja joustavan päällystelaatan rakennetta jäykistävä ja kantavuutta parantava vaikutus on vähäinen. Tämänkaltaisilla rakenteilla päällysteen väsymisen sijaan kriittisin vaurioitumismekanismi onkin sitomattomien kerrosten materiaalin tai jopa pohjamaan pystykuormituksesta johtuvat erityyppiset pysyvät muodonmuutokset. Tien pinnalla nämä näyttäytyvät poikkisuuntaisena epätasaisuutena, eli urina ja harjanteen kasvuna. Päällysteen halkeamiseen johtava syy on näissä tapauksissa tyypillisesti voimakasta deformatumista seuraava päällystelaatan repeytyminen päällystemateriaalin muodonmuutoskestävyyden ylittyessä (Belt et al 2002, s. 25, 44).

Pysyvien muodonmuutosten syntyminen rakenteeseen ei ole väsymisvaurioiden tavoin riippuvainen kuormitussykliin lukumäärästä. Varsinkin keväisin roudan sulamisaikaan vaurioita voi syntyä hyvinkin vähäisen kuormituskertamäärän seurauksena. Pysyviä muodonmuutoksia on tutkittu laajasti esimerkiksi ROADEX-projektin puitteissa (Dawson & Kolisoja 2006). ROADEX-projektin mukaan pysyvien muodonmuutosten aiheuttama urautuminen jaotellaan syntymekanisminsa perusteella neljään tyyppiin (Kuva 3).

ROADEX-jaottelun perusteella tienpinnan poikkisuuntaisen epätasaisuuden taustalla on joko pystykuormituksen aiheuttama rakenteen tiivistyminen (Tyyppi 0) tai materiaalien leikkauslujuuden ylittymistä seuraava löyhtyminen ja materiaalien siirtymät (Tyypit 1 ja 2). Heikkolaatuisilla kiviaineksilla muodonmuutokset tapahtuvat rakennekerroksissa, hyvälaatuiset kiviainekset puolestaan saattavat siirtää deformatumisen tapahtumaan syvemmällä pohjamaassa. Ainoastaan tyyppin 3 urautumisen mekanismi on hieman erilainen; kulumisurautumisen taustalla on pystykuormituksen sijaan pääosin nastarenkaiden

käytön aiheuttama päällysteen pinnan iskevä ja hiova mekaaninen kuormitus, jonka vaikutus voimistuu tienpinnan ollessa märkä ja paljas. Leutojen talvien, runsaamman suolauksen ja suurempien liikennemäärien vuoksi päällysteen kuluminen on Etelä-Suomessa huomattavasti pohjoista voimakkaampaa (Kurki 1994).

Urautumisen voimakkuuteen vaikuttavat myös esimerkiksi kaiteet, reunakivet ja kavenukset, joiden kohdalla liikenne kanavoituu samoihin ajouriin. Erityisesti tällä on vaikutusta tyyppien 1 ja 3 urautumiseen. Lopullinen urakasvu on tyypillisesti seurausta eri urautumistyyppien yhdenaikaisesta vaikutuksesta. Kaikki urautumista aiheuttavat mekanismit eivät kuitenkaan ole yksinomaan ei-toivottuja. Rakenteen tiivistyminen pyöräkuormien alla kasvattaa samalla sen muodonmuutoskestävyyttä. Erityisesti ilmiöllä on merkitystä sulamiskauden jäljiltä löytyneiden kerrosten uudelleen tiivistyessä ja lujittuessa. (Dawson & Kolisoja 2004)

	Urautumisen syy ja kuvaus	
Tyyppi 0	Rakenteen tiivistyminen; laaja-alainen loivapiirteinen ura. Jonkinasteista alkutiivistymistä tapahtuu uusissa rakenteissa käytännössä aina käyttöönoton jälkeen.	
Tyyppi 1	Rakenteen pintaosan plastinen deformaatio; ura, jonka reunalla pallo materiaalin siirtymien ja löyhtymisen seurauksena.	
Tyyppi 2	Pohjamaan plastinen deformaatio; leveä ura, jonka sivulla tienpinta hieman kohonnut pohjamaan siirtymien seurauksena, harjanteen kasvu.	
Tyyppi 3	Päällysteen kuluminen; kapea, jyrkkäreunainen ura, etäisyys vastaa henkilöautojen raideväliä.	

Kuva 3: ROADEx-projektin mukainen urautumisen luokittelu (muokattu Dawson & Kolisoja 2004, s. 13 – 17; kuvat www.roadex.org).

Puutteellinen kuivatus

Kuivatuksen kunnossapito jää usein liian vähälle huomiolle, vaikka toimimaton kuivatus on monesti perimmäinen syy monille tierakenteen vaurioille. Muun muassa PEHKO -projektin toimintasuunnitelma-asiakirjassa (2015) on listattuna kuivatukseen liittyviä tekijöitä, jotka hoitourakoissa tulisi jatkossa nykyistä paremmin huomioida. Esimerkiksi liian matalat tai syystä tai toisesta tukkeutuneet ojat ja niissä seisova vesi mahdollistavat veden kapillaarisen tunkeutumisen tien rakennekerroksiin. PEHKO-projektin suositusten

mukaan ojan pohjan korkeusaseman tulisikin olla ainakin 20 cm tierakenteen pohjan tason alapuolella, jotta saadaan taattua rakenteen pysyminen kuivana.

Vesi voi tunkeutua rakenteeseen myös suotautumalla painovoimaisesti päällysteen halkeamien kautta. Tielle urautumisen, puutteellisten kaltevuusjärjestelyjen tai padottavien reunapalteleiden vaikutuksesta lammikoituva vesi kiihdyttää suotautumista ja heikentää liikenneturvallisuutta.

Kuivatuspuutteiden vaikutus on korostunut entisestään siirryttäessä enenevässä määrin käyttämään murskattuja kiviaineksia teiden rakennekerroksissa. Vertailevien kokeiden perusteella (Kolisoja et al 2001, s. 3 – 6) murskattujen kiviainesten taipumus korkeaan vedenimuun on tyypillisesti luonnonsoraa suurempi, joskin erot eri murskenäytteiden ominaisuuksissa ovat huomattavia. Ongelmallisimmille materiaaleille on lisäksi tyypillistä, että kuivana niiden moduuliarvot ovat erinomaisia, mutta altistuessaan kosteudelle materiaalien ominaisuudet menetetään lähes täysin. Esimerkiksi Ruotsissa 1990-luvun lopussa koetiekoneella tehtyjen testien havaintona oli, että tyypillisen vähäliikenteisen, ohutrakenteisen tien jäljellä oleva raskaiden akselien ylityskertojen lukumäärä saattoi kuivalla rakenteella olla jopa 2,5 – 5 -kertainen verrattuna kasteltuun rakenteeseen (Wiman 2001, s. 9).

Etenkin routaongelmien hallinnassa toimiva kuivatus on ensiarvoisen tärkeää. Kylmissä olosuhteissa veden pääsy jäätyneeseen rakenteeseen kasvattaa jäälinssejä ja pahentaa routaongelmia, jotka näyttäytyvät routanousuna, heittoina ja näiden seurauksena tapahtuvana päällysteen halkeiluna. Jäätymis-sulamissykleille altistuminen myös löyhdyttää veden tiilavuuden muutosten myötä rakennetta altistaen sen tiivistymisestä johtuvalle tyyppin 0 urautumiselle ja materiaalien siirtymille (Dawson & Kolisoja 2004, s. 13). Lisäksi jäälinsien keväinen sulaminen johtaa rakenteen kosteustilan nousuun. Pahimmillaan sulanut rakenne voi olla kauttaaltaan veden kyllästämä.

Kuormitettaessa veden kyllästämää rakennetta välittyy osa kuormasta kiviainespartikkelien sijaan näiden välisissä huokosissa olevan veden kannettavaksi, jolloin huokosiin syntyy huokosveden ylipaine. Huokosveden ylipaineen vaikutuksesta kiviainespartikkelien välinen tehokas jännitys ja sen seurauksena myös partikkeleiden välinen kitka pienenevät. Tällöin partikkelit pääsevät helpommin liikkumaan toistensa suhteen ja rakenteeseen syntyy deformaatioita. (Dawson & Kolisoja 2004, s. 18-19). Erityisesti jäälinsien sulamista seuraava kosteustilan nousu altistaa rakennetta tyyppien 1 ja 2 urautumiselle (Varin & Saarenketo 2014).

Lisäksi kantavan kerroksen yläosan ollessa märkä saattavat toistuvat raskaiden ajoneuvojen ylityskerrat ja niihin liittyvä värähtelevä kuormitus johtaa veden pumppautumiseen päällysteeseen ja jopa sen läpi. Ilmiö edesauttaa päällysteen nopeaa väsymistä. Erityisen yleistä myös pumppautuminen on keväisin roudan sulamisaikaan.

Geotekniset ongelmat

Geoteknisiä ongelmia ja vaurioita voivat aiheuttaa luiskien ja penkereiden riittämätön stabiliteetti sekä painumat erityisesti pehmeillä pohjamailla. Painuman absoluuttista suuruutta kriittisempiä ovat suuret painumaerot. Pienipiirteisistä painumista, epätasaisesta routanoususta tai puutteellisista siirtymäarakenteista aiheutuvat heitot johtavat raskaan liikenteen alla suuriin dynaamisiin kuormitushuippuihin ja saattavat johtaa paikalliseen urautumiseen ja muihin vaurioihin (Varin & Saarenketo 2014).



Kuva 4: Pohjamaan laatuun liittyvä melko suuri ja laaja-alainen painuma käsivarren Lapin palsasuokohteella valtatiellä 21 (kuva: Timo Ryttilähti 2016).

Suunnittelu- ja työvirheet

Suunnittelu- ja työvirheisiin voi lukeutua suuri määrä erityyppisiä rakenteen kestävyysvaikuttavia tekijöitä. Herronen et al. (2015) listaa näihin muun muassa riittämättömät kerrospaksuudet, huonolaatuiset materiaalit, puutteelliset siirtymäarakenteet, vanhojen rakenteiden parannettuihin kohteisiin aiheuttamat heijastushalkeamat ja huonosti tiivistetyt rakennekerrokset. Työvirheet näkyvät tienkäyttäjälle selvästi myös esimerkiksi päällysteen purkautuessa lajittumien tai päällystekerrosten riittämättömän tartunnan vuoksi.

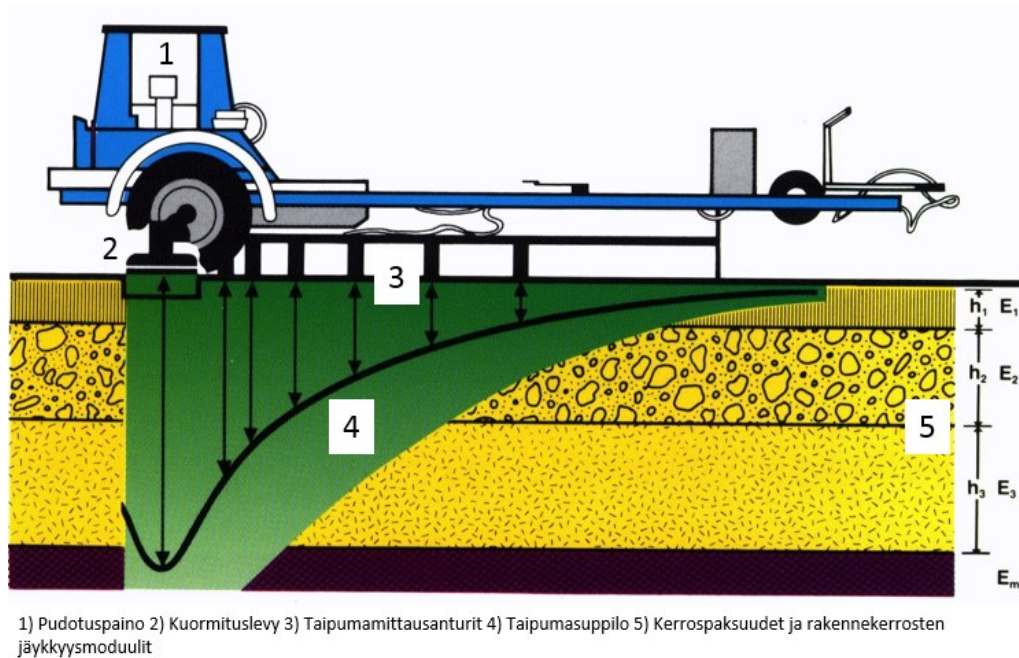
3. TIERAKENTEEN TAIPUMAMITTAUKSET

3.1 PPL-mittauksen periaate

PPL- eli pudotuspainolaitemittaus on vakiintunut tierakenteen mekaanisen kuormitusvas- teen pistekohtainen tutkimusmenetelmä. Menetelmää on käytetty vuosikymmenten ajan eri puolilla maailmaa, sitä on tutkittu laajasti ja se on yleisesti hyväksytty käyttökel- poiseksi työkaluksi tierakenteiden kuormituskestävyyden arvioinnissa. Näin ollen tämän työn yhteydessä PPL-menetelmän toimivuustarkastelu on sivuutettu ja keskitytään aino- astaan menetelmän tekniseen puoleen. Aluksi kuitenkin sivutaan hieman mittauksen taus- talla olevaa teoreettista ajatusmallia.

PPL-mittauksen kantava ajatus on tallentaa tien pinnasta tietoa tunnetun suuruisella voi- malla rakenteeseen kohdistetun kuormituksen aiheuttamien rakenteen taipumien suuruu- desta. Mitattujen taipumien perusteella saadaan kustakin mittauspisteestä määritettyä ra- kenteen syvyysuuntaista mekaanista kuormitusvastetta kuvaava taipumasuppilo. Taipu- masuppilon muodon perusteella voidaan tehdä arvioita rakenteen jäykkyysominaisuuksista ja kuormituskestävyydestä eri syvyyksillä. Taipumiin perustuen on kehitetty myös lukuisia rakenteen toimintaa kuvaavia tunnuslukuja ja moduuli-arvoja, joille on käytännön kokemuksen kautta määritetty rakenteen vaurioitumisriskin kannalta kriittisiä raja-arvoja. Näitä käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.4. Taipumamuotoon paneudutaan puolestaan TSD-tulosten käsittelyn yhteydessä kappaleessa 5.1.1.

PPL-mittauksessa rakenteen taipuma tuotetaan kohdistamalla tien pintaan dynaaminen iskukuormitus, joka pyrkii simuloimaan raskaan liikenteen tierakenteeseen aiheuttamaa rasitusta (Spoof & Petäjä 2000). Kuormitus aikaansaadaan pudottamalla paino tien pin- nan kanssa kosketuksessa olevaa, pyöreää kumivaimennettua kuormituslevyä vasten. Kuormituslevyn tavanomainen halkaisija on 300 mm. Kuormitus on erittäin nopea, kuor- mituspulssi kestää vain noin 24 ms (Kalliainen et al 2011, s. 29). Kuva 5 esittää pudotus- painolaitetta tärkeimpine osineen, sekä havainnollistaa taipumasuppilon käsitettä. Kuvan oikeassa laidassa on myös esitelty tierakenteen pinnalta mitatun kantavuuden määrittävät rakennekerrosten jäykkyysmoduulit ja kerrospaksuudet. Moduuli- ja kantavuuslasken- taan palataan tämän työn kappaleessa 9.



Kuva 5: Pudotuspainolaitteen keskeiset osat, mitattava taipumasuppilo ja taipumista laskettavat rakennekerrosten moduulit (muokattu: www.sme-usa.com).

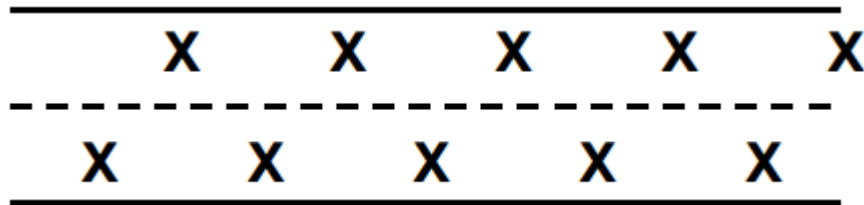
PPL-mittauksessa pudotuskorkeutta ja painon suuruutta voidaan säädellä, mutta kuormitustapahtuma pyritään pitämään mahdollisimman vakioituna läpi mittauksen. Yleensä kuormituksena käytetään 50 kN voimaa, joka vastaa kuorma-auton 10 tonnin akselimassaa. Iskukuormituksen aiheuttaman taipuman suuruus rekisteröidään taipumamittausantureilla, joita on aina vähintään kuusi kappaletta. Anturit mittaavat rakenteen taipumaa 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100 ja 2400 mm etäisyydellä kuormituskeskipisteen etupuolella. Lihavoituja etäisyyksiä tulee käyttää aina. Karkeasti tietyllä etäisyydellä mitattu taipuma kuvaa muodonmuutosta vastaavalla syvyydellä. Mitä paksummat rakennekerrokset ja jäykempi rakenne tiellä on, sitä kauemmaksi antureita tulisi sijoittaa, jotta myös pohjamaan ominaisuuksiin päästäisiin käsiksi (Spoof & Petäjä 2000).

Kussakin mittauspisteessä tehdään kaksi pudotusta, joista jälkimmäinen on tierakenteen taipumien ja niistä laskettavan koko rakenteen keskimääräistä jäykkyyttä eli niin kutsuttua kantavuutta kuvaavan E2-moduulin kannalta merkitsevä. Mikäli mittaus tehdään laadunvarmistusmielessä käyttäen tuloksia rakenteen tiiviystilan arviointiin, on merkitystä lisäksi ensimmäisestä ja toisesta pudotuksesta määriteltyjen moduulien suhteella E_2/E_1 , jota kutsutaan tiiviyssuhteeksi (Kalliainen et al 2011, s. 30).

Pistekohtainen taipumamittaus on menetelmänä aikaa vievä, sillä pudotuksen ja taipumien rekisteröinnin aikana kuormituslevyn sekä taipuman suuruutta mittaavien geofonien on oltava kosketuksissa tienpinnan kanssa. Näin ollen kukin mittaus on tehtävä mittalaitteen seistessä paikallaan, mikä väkisin heikentää PPL-mittauksen työsaavutusta. Liikennevirran seassa pysähtelevä mittalaite on myös kiistaton työ- ja liikenneturvallisuusriski.

Tieverkkotason kantavuusmittauksissa käytetty mittauspistetiheys on 100 metriä, kun taas hankekohtaisissa mittauksissa käytetään yleisesti 50 metrin pisteväliä (Tiehallinto

2005, s. 7, 10). Tyypillisesti mittauspisteet on limitetty vuoroin tieosoitteen lasku- ja kasvusuuntien kaistoille (Kuva 6) (Spoof & Petäjä 2000, s. 8). Mittauspisteiden välillä taipumatieto on interpoloitua. Näin ollen PPL-mittatiedon edustavuuteen saattaa liittyä ongelmia, etenkin pohjasuhteiden ja tierakenteen vaihdellessa voimakkaasti (Tiehallinto 2005, s. 10).



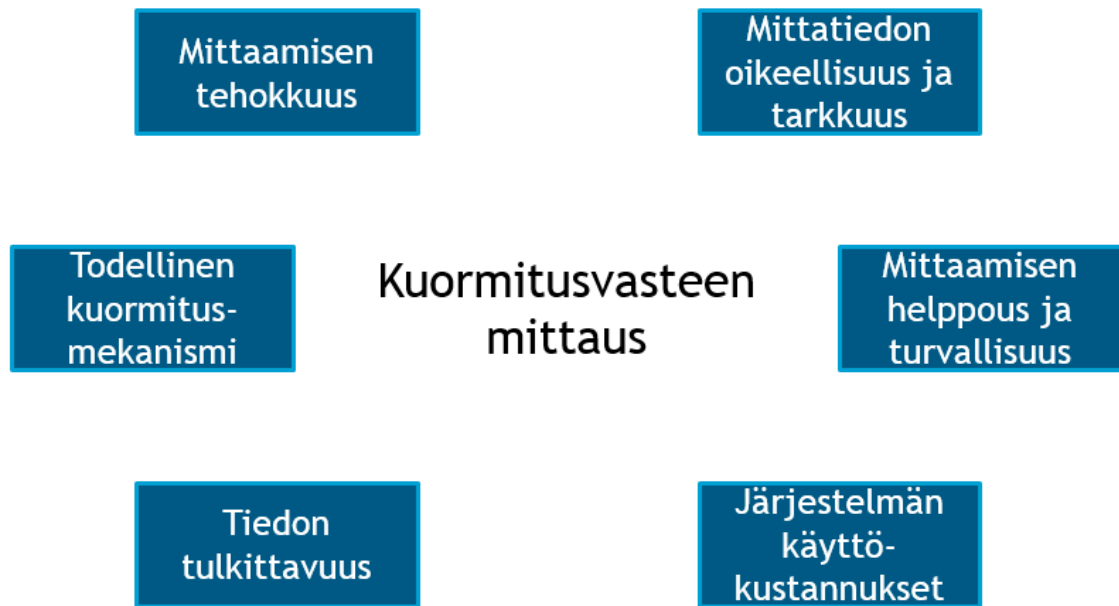
Kuva 6: PPL-menetelmän tavanomainen mittauskaavio yksiajorataisella tiellä (Spoof & Petäjä 2000, s. 8).

Mitatut taipumat normalisoidaan lämpötilan ja kuormituksen suhteen. Kuormituksen normalisointi tapahtuu tyypillisesti vastaamaan 50 kN tavoitevoimaa. Lämpötilan puolesta taipumat korjataan Suomessa vastaamaan taipumia +20 °C lämpötilassa, eri maissa tavoitelämpötila voi vaihdella. Esimerkiksi Ruotsissa käytetään + 10 °C lämpötilaa. Lämpötilakorjauksen vallitsevaa käytäntöä on kuvailtu jäljempänä kappaleessa 3.3.

3.2 TSD-mittalaitteisto ja mittauksen periaate

Teiden rakenteellista kuntoa ja kuormituskestävyyttä mittaavien menetelmien kehittämistä ohjaavat moninaiset pyrkimykset (Kuva 7). Greenwood Engineering A/S:n Traffic Speed Deflectometer on ehkä pisimmällä näiden tavoitteiden tuotteistamisessa. TSD-menetelmän merkittävimpiä etuja ovat tehokkuutta ja turvallisuutta parantava liikenteen nopeudella tapahtuva mittaus ja käytännössä jatkuvana saatava taipumadata. Mitattavat taipumat synnytetään rakenteeseen todellisen pyöräkuorman avulla, jolloin myös kuormitustilanne vastaa todellista, raskaan liikenteen aiheuttamaa liikenneerasitusta, eikä ainoastaan pyri simuloimaan sitä.

Myös TSD-tulosten toistettavuuden on useissa tutkimuksissa todettu olevan hyvää luokkaa. Muun muassa Destia Oy:n suomalaisilla teillä kesällä 2013 teettämien mittausten osana tehtyjen toistokokeiden perusteella korrelaatio eri mittauskertojen välillä on jopa 90 % (Virtala 2016). Tosin monien muiden testausmenetelmien tavoin TSD-mittauksessakin tulosten oikeellisuus riippuu pitkälti myös laitteiston oikeasta ja johdonmukaisesta käyttötavasta. Esimerkiksi päällysteen väsymistä tapahtuu vain liikenteen kuormittaman ajouran kohdalla, näin ollen mitattaessa ajouran sivusta voidaan saada huomattavasti parempia tuloksia kuin rakenteen todellinen kunto edellyttäisi.

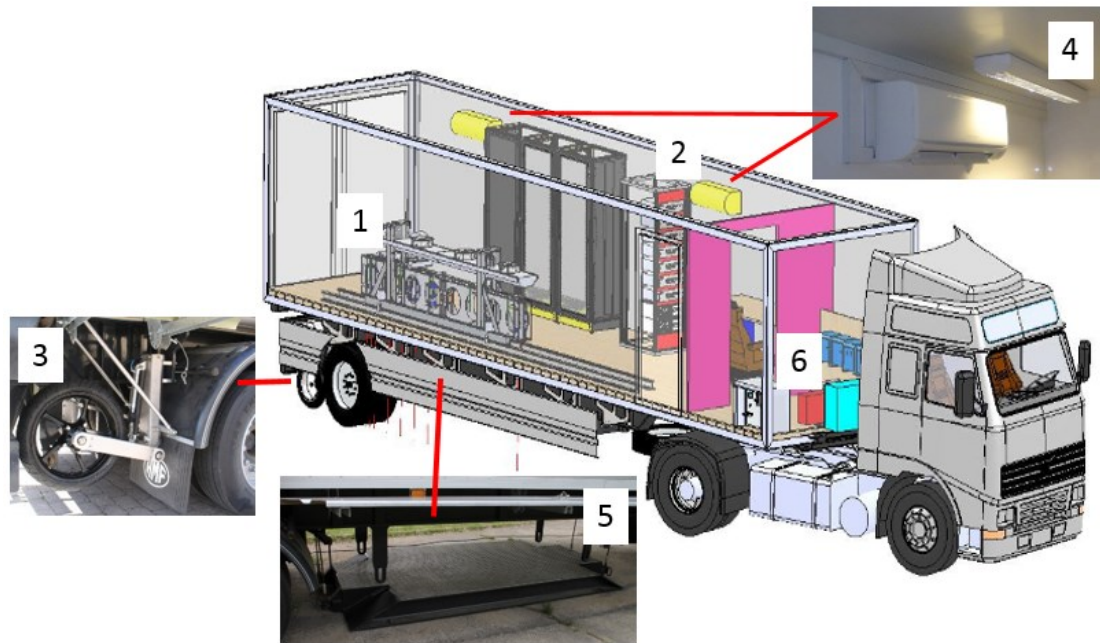


Kuva 7: Teiden mekaanista kuormitusvastetta mittaavien menetelmien kehitystä ohjaavat yleiset tavoitteet (muokattu Zofka & Sudyka 2015).

TSD-menetelmän käytettävyyttä lisää entisestään se, että sen tuottamat taipumatulokset ovat eri puolilla maailmaa tehtyjen vertailevien kokeiden valossa hyvin pitkälle samansuuntaisia käyttöön vakiintuneella pudotuspainolaitteella samoilta teiltä mitattujen taipumien kanssa. Täysin yhteneviä tuloksia nämä menetelmät eivät varsin poikkeavan kuormitusmekanisminsa johdosta kykene tuottamaan edes täsmälleen yhtenevissä, ideaalisissa olosuhteissa.

Mittalaitteisto

TSD-mittausyksikkö muistuttaa ulkoisesti tavallista yksiakselista kuorma-auton puoliperävaunua (Kuva 8). Perävaunun pituus on 11,25 m, leveys 2,55 m ja korkeus 3,76 m (greenwood.dk). Perävaunun massa toimii mittauksen kuormittavana voimana samalla, kun siihen asennetut instrumentit rekisteröivät, prosessoivat ja tallentavat rakenteen kuormituskäyttäytymistä. Laitteistoa operoi kahden hengen miehistö, joista toinen on kuljettaja ja toinen käyttää ja valvoo mittalaitteita niin ikään vetoauton ohjaamosta käsin. Monitorointiin käytettävää tietokonetta lukuun ottamatta vetoautoon ei ole sijoitettu muita mittauksen vaatimia instrumentteja, joten vetoauto on melko pienellä vaivalla vaihdettavissa tarpeen niin vaatiessa.



1) Taipuma-antureita kannatteleva palkki 2) Räkki tietokoneilaitteille 3) Mittapyörä kuljetun matkan ja nopeuden tallentamiseen 4) Kuormakorin lämmönsäätelyjärjestelmä 5) Painosäiliö kuormittavan voiman säätelyä varten 6) Akusto

Kuva 8: TSD-mittausajoneuvo mittalaitteineen (muokattu: greenwood.dk).

Varsinaiset mittauksessa ja datan käsittelyssä sekä tallentamisessa tarvittavat instrumentit on sijoitettu perävaunun kuormakorin sisään. Kuormakori on lämpöeristetty ja sisälämpötilaa säädellään mahdollisimman stabiilien olosuhteiden luomiseksi. Taipumien rekisteröinti tapahtuu optisesti, ilman kontaktia tien pinnan kanssa. Tämä mahdollistaa osaltaan menetelmän nopeuden. Mitta-anturit on kiinnitetty kuormakorin sisään asennettuun jäykkään teräspalkkiin, joka on sijoitettu ajoneuvon pituussuuntaisesti mittaamaan paripyörien välissä, oikean puoleisessa ajourassa kulkevaa linjaa.

Ensimmäinen taipuma-anturi on suunnattu mittaamaan taipumanopeutta mahdollisimman läheltä kuormituspistettä, käytännössä kuormittavan akselin erikoisvalmisteinen pyörännapa mahdollistaa mittaamisen noin 100 mm päästä kuormituspisteen etupuolelta. Muut laseranturit sijaitsevat tätä kauempana pyöräparin etupuolella, tyypillisesti samoilla etäisyyksillä kuormituspisteestä kuin PPL:n geofonit. Uusimmissa malleissa palkkia on mahdollista liikuttaa pituussuunnassa siten, että mittausta on mahdollista parilla anturilla myös akselin takapuolelta tai vaihtoehtoisesti kauempaa edestä (Pedersen et al. 2013, s. 7-8), tulevaisuudessa antureita on tarkoitus sijoittaa myös pysyvästi kuormituspisteen takapuolelle rakenteen palautumiskäyttäytymisen selvittämiseksi.

Muita mittausta tukevia järjestelmiä ajoneuvossa ovat digitaalikamera, GPS-vastaanotin tarkan sijainnin määrittämiseksi, mittapyörä nopeuden ja kuljetun matkan tallentamista varten, monipuoliset gyroskoopit ja kiihtyvyysanturit mitatun tiedon korjaamiseksi sekä kerätyn aineiston käsittelyn ja tallentamisen tarpeita palvelevat laitteistot (Pedersen et al. 2013, s. 7). Lisäksi kokonaisuuteen voidaan liittää asiakkaan toiveiden mukaan muitakin tierakenteen kunnon monitorointiin liittyviä osia, kuten laserkeilaimia ym.

Tierakenteen kuormitus TSD-mittauksessa

TSD-mittalaitteella tierakenteen taipumamittaus on mahdollista liikennevirran nopeudella. Käytännössä valmistajan ilmoituksen mukaan mittaukseen soveltuva nopeusalue on 38 – 90 km/h, mutta esimerkiksi Etelä-Afrikan kansallinen tieviranomaisen SANRAL on todennut omissa instrumentoitujen koekohteiden testeissään TSD:n tuottavan todennukaista tietoa rakenteen vasteesta aina 2,5 km/h nopeudesta alkaen. Rakenteen kuormituskäyttäytyminen kuitenkin muuttuu ja mitatun vasteen nopeusriippuvuus alkaa kasvaa eksponentiaalisesti mittausnopeuden laskiessa lähelle 30 km/h, joten erittäin alhaisissa nopeuksissa mitattu vaste ei ole vertailukelpoinen tavanomaisissa nopeuksissa saatujen tulosten kanssa. Valmistajan suosittelemissa mittausnopeuksissa kuormitusvasteen nopeusriippuvuuden on lyhyemmästä kuormitusajasta johtuen ilmoitettu olevan lähes olematon. (Kannemeyer et al 2014)

TSD-menetelmän kuormitusmekanismi on todellinen pyöräkuorma, jota esimerkiksi PPL-mittaus vain pyrkii simuloimaan. Näin mitattu kuormitusvaste on likimain sama, minkä raskas liikenne synnyttää rakenteessa. Luonnollisesti telin perättäisten akselien kumulatiivista vaikutusta yksiakselinen TSD ei pysty mallintamaan, mutta toisaalta laitteen tarkoituksaan ei ole olla täydellinen rekkasimulaattori, vaan PPL-tulosten kanssa samansuuntaisia tuloksia tuottava taipumamittalaite. TSD-puoliperävaunun ainoa akseli on samalla laitteiston kuormitusakseli, jonka paripyörät välittävät tien pintaan mitattavaa hetkellistä muodonmuutosta aiheuttavan kuorman. Kuormitusakseli on tarkoituksellisesti sijoitettu kauas vetoautosta, jottei vetoauton vaikutus heijastu mitattuihin taipumiin.

TSD-mittauksessa kuormittavana voimana käytetään yleensä staattista 50 kN pyöräkuormaa, joka vastaa kuorma-auton 10 tonnin akselimassaa. Voima vastaa siis suuruudeltaan PPL-mittauksessa tien pintaan kohdistettavan iskukuormituksen suuruutta, mikä osaltaan parantaa tulosten vertailukelpoisuutta.

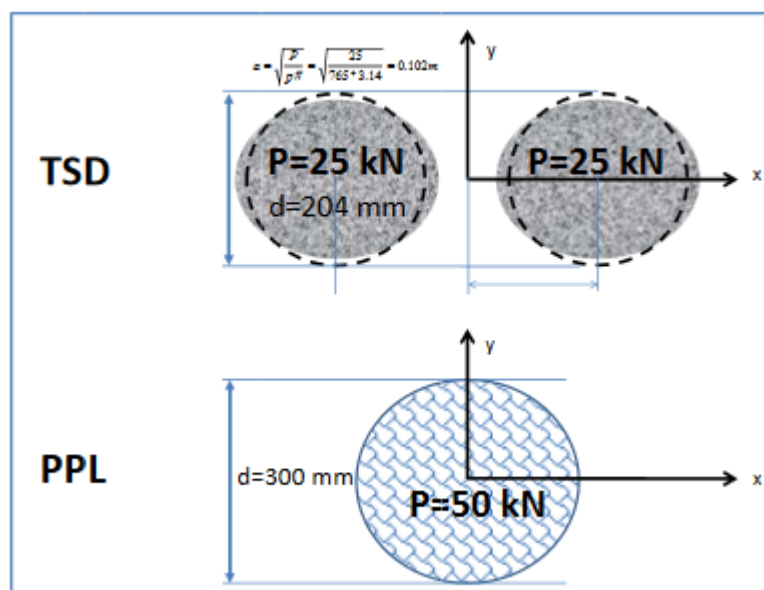
TSD:n staattinen kuorma muodostuu pääosin perävaunun ja sen sisään sijoitettujen instrumenttien omasta massasta. Lopusta kuormasta vastaavat erilliset akselin yhteyteen perävaunun alle sijoitettuun painosäiliöön laitettavat lisäpainot, joiden avulla kokonaiskuorma myös säädetään haluttuun arvoon. (Flintsch *et al.* 2011, s.3; Zofka & Sudyka 2015)

Koska pudotuspainolaitemittaus tapahtuu paikaltaan pudottamalla sama kappale vakio- korkeudelta, ei menetelmän kuormittava voima juurikaan vaihtelee mittauksen aikana. Jatkuvoimaisuudessa mittauksessa tilanne on toinen. Liikkuvaan mittalaitteeseen kohdistuu tien pinnasta ja ympäristöstä toistuvia dynaamisia voimia, jotka ovat seurausta esimerkiksi tien sivukaltevuudesta, pituussuuntaisesta epätasaisuudesta, ilmavirtauksista tai kuljettajan toiminnasta. Nämä aiheuttavat ajoneuvon koriliikkeitä, joiden johdosta lopullinen tienpintaan kohdistuva kuormitus poikkeaa käytännössä jatkuvasti ideaalitalanteen staattisesta kuormasta.

Virtalan (2016, s. 42, 89) PTM-profiiliin perustuvien laskelmien mukaan mittauksen aikainen todellinen pyöräpaino vaihtelee dynaamisen kuormituslisäyksen johdosta 40 – 60 kN välillä, hyvin epätasaisilla teillä vaihteluväli saattaa olla jopa 30 – 70 kN. Virtala ei

kuitenkaan ole Destian kesän 2013 TSD-mittausten tuloksia analysoidessaan havainnut korrelaatiota simuloidun pyöräpainon ja maksimitaipuman suuruuden välillä, tai epäilee sen hukkuvan tierakenteen vaikutuksen alle. Lisäksi TSD-laitteiston keräämän aineiston kaltevuuskorjausmenetelmät ovat kehittyneet kesän 2013 jälkeen, joten siinä mielessä Virtalan havainnot hetkellisen kuormituksen ja korjatun taipuman yhteydestä eivät ole enää relevantteja.

Kuormitusakselilla käytettävän paripyörän rengaspaine on tarkoin säädelty. Mittauksen aikana kummankin renkaan kosketuspinnan keskimääräisen halkaisijan on otaksuttu olevan noin 204 mm (Virtala 2016, s. 42). Pudotuspainolaitteesta poiketen TSD-mittauksessa kuorma ei kohdistu suoraan mittauspisteeseen, vaan jakautuu mittaustilanteen kahdelle puolelle (Kuva 9). Lisäksi TSD-menetelmän yhteenlaskettu kuormituspinta-ala on hie- man pienempi kuin PPL:n pyöreän kuormituslevyn ala.



Kuva 9: TSD- ja PPL-mittausten kuormitus tilanne (Virtala 2016, s. 42).

Kuormitusvasteen mittaaminen

Pudotuspainolaitemittauksesta poiketen TSD-laitteistolla ei rekisteröidä tienpinnan absoluuttista taipumaa, vaan kuormituksen alla tapahtuvan taipuman syntymisnopeutta. Koska nopeus määritelmänsä mukaisesti kuvaa paikan muutosta ajan suhteen, saadaan taipuman suuruus määritettyä laskennallisesti taipumanopeutta integroimalla. Taipumanopeus määritetään optisesti käyttäen laserantureita.

Laseranturit on asennettu niitä kannattavaan palkkiin noin 2° kulmaan pystysuuntaan nähden. Tämä mahdollistaa kussakin mittauspisteessä määritetyn nopeusvektorin vaaka- ja pystykomponenttien, eli mittaustilanteen horisontaalisen nopeuden ja tierakenteen pinnan vertikaalisen taipumanopeuden, erottelun.

Laserantureiden lukumäärä ensimmäisissä valmistuneissa laitteissa oli 4, joista 3 oli varsinaisia rakenteen vastetta mittaavia antureita. Näiden sijainti oli 100, 200 ja 300 mm etäisyydellä kuormituspisteestä. Uusimmissa laitteissa antureita on jo 7 – 10 kappaletta

tilaajan toiveitten mukaan. Suomessa käytetyssä puolalaisen IBDiM:n laitteistossa anturien lukumäärä on 8, joista kauimmainen mitta-anturi sijaitsee 1500 mm kuormituspisteen etupuolella. Näin saadaan jo melko kattavasti tietoa koko rakenteesta, sillä karkeasti taipuma tietyllä etäisyydellä kuormituspisteestä kuvaa noin vastaavalla syvyydellä rakenteen pinnasta olevan kerroksen mekaanista toimintatapaa (Spoof & Petäjä 2000, s. 12 – 13).

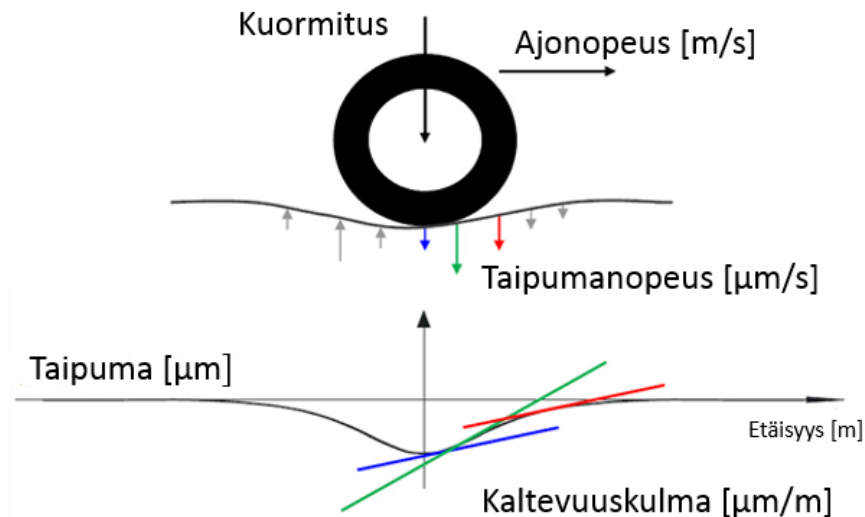
Yksi TSD:n laserantureista on aina niin kutsuttu verrokkianturi, joka on asennettu niin kauas kuormituspisteen eteen (3500 mm), ettei sen kohdalla esiinny kuormituksesta johtuvia rakenteen taipumia. Verrokkilaserin mittaamia arvoja käytetään yhdessä kiihtyvyyssanturien ja gyroskooppien tuottamien tietojen kanssa eliminoimaan ajoneuvon kori-liikkeiden vaikutusta varsinaisten mitta-anturien tuottamasta taipumanopeustiedosta. (Pedersen et al. 2013, s. 7 – 8)

TSD:n optisen menetelmän toiminta perustuu Doppler-ilmiöön, eli liikkuvasta lähteestä lähtevän ja siihen takaisin heijastuvan lasersäteen taajuuden muutokseen. Käytännössä mittaus tapahtuu Pedersenin et al. (2013, s. 9) mukaan siten, että anturista lähtevä säde jaetaan kahtia. Toinen puoli lasersäteestä suunnataan tienpintaan, josta osa heijastuu takaisin anturiin. Anturissa takaisin heijastuneen säteen taajuutta verrataan alkuperäisen säteen toisen puolikkaan taajuuteen, ja näiden erotuksena saadaan laskennallisesti määritettyä taajuuden muutos ja siitä edelleen tierakenteen vertikaalinen taipumanopeus.

Taipumanopeuden ja mittausajoneuvon horisontaalisen nopeuden osamääränä saadaan laskettua taipuman kaltevuuskulma (slope) kaavan (1) mukaisesti (Jenkins 2009; Harasim & Sudyka 2014).

$$\text{Kaltevuuskulma} = \frac{\text{Taipumanopeus}}{\text{Ajonopeus}} \quad (1)$$

Kussakin laserin asemassa määritettyihin kaltevuuskulmiin (Kuva 10) saadaan sovitettua PPL:n taipumasuppilaa vastaava taipumakuvaaja ja lisäksi arvojen perusteella laitetoimittajan ohjelma laskee maksimitaipuman suuruuden sekä joitakin rakennetta kuvaavia tunnuslukuja (Zofka & Sudyka 2015). Sovitteen tarkkuus paranee, kun käytössä on kehittyneempi TSD, jossa on useampia mittaavia antureita.



Kuva 10: Pyöräkuorman tierakenteeseen aiheuttama taipuma ja TSD-menetelmän hyödyntämiä suureita (muokattu greenwood.dk).

Taipumatiedon keräys tapahtuu mittausajoneuvon nopeudesta riippuen noin 20 mm välein (ajallinen maksimiresoluutio 1 ms), mutta koska dataan tulee aina jonkin verran kohinaa, tulos annetaan keskiarvona pidemmälle, tyypillisesti 1 – 10 m (jopa 100 m), matkalle (Flintsch et al. 2011, s. 6-9; Jenkins 2009). Suomessa tehtyjen mittausten raakadata on toimitettu 10 metrin liukuviksi keskiarvoiksi laskettuna.

Laitteiston kalibrointi

TSD-laitteisto on erittäin sensitiivinen laserantureiden kulman muutoksille. Jo asteen tuhannesosien poikkeama kallistuskulman arvossa saattaa johtaa kymmenien prosenttien virheisiin taipumamittauksessa, joten laitteiston oikea kalibrointi on ensiarvoisen tärkeää (Jenkins 2009). Tästä syystä myös antureita kannattelevan palkin ja kuormakorin sisälämpötilaa monitoroidaan ja säädellään mittauksen aikana lämpölaajenemisesta johtuvien muutosten estämiseksi. Laitteisto kalibroidaan tietyssä lämpötilassa, josta mittauksen aikaiset olosuhteet eivät saa poiketa liikaa tulosten kärsimättä. Uudemmat laitteistot, mukaan lukien Suomessa käytetty, on varustettu kaltevuuskulman korjaustekniikalla, jonka pitäisi korjata mahdollista kulmavirhettä ja vähentää kalibrointiriippuvuutta.

TSD:n kalibrointikäytännöt vaihtelevat hieman laitteiston operaattorista riippuen. IB-DiM:n laitteiston kalibrointi tapahtuu mittaamalla saman lyhyehkön ja taipumaominaisuuksiltaan tunnetun tiejakson samaa mittalinjaa useita kertoja, muutellen antureiden pituussuuntaista sijaintia (Harasim & Sudyka 2014). Kun tunnetaan tierakenteen taipumanopeus sekä kunkin anturin vaakasuuntainen etäisyys kuormituspisteestä, voidaan kunkin anturin kulma laskea, ja täten matemaattisesti korjata kulmaero verrokkianturiin nähden.

Kutakin kalibrointikertaa seuraavat lisäksi TSD- ja PPL-menetelmillä tehdyt vertailevat testimittaukset valituilla tieosilla Varsovan lähistöllä (Harasim & Sudyka 2014). Näissä mittauksissa on kirjoittajien mukaan erityisesti kiinnitettävä huomiota eri menetelmillä

tehtyjen mittausten keskinäiseen ajoitukseen: lämpötilan ja auringon säteilyn määrän tulisi olla vakaa, lisäksi mittaukset on tehtävä samalta linjalta ja huolehdittava tulosten normalisoinnista niin lämpötilan kuin kuormituksenkin suhteen.

3.3 Taipumamittausaineiston lämpötilakorjaus

Bitumilla sidotun asfalttipäällysteen jäykkyys- ja muodonmuutosominaisuudet ovat pitkälti riippuvaisia päällysteen lämpötilasta. Niinpä taipumien ja näistä laskettavien taipumasuppiloindeksien vertailtavuuden vuoksi saadut taipumat on käytettyyn mittalaitteeseen katsomatta normalisoitava vastaamaan taipumia valitussa tavoitelämpötilassa. Tavoitelämpötila vaihtelee maittain, Suomessa tierakenteen taipumien lämpötilakorjaus tapahtuu +20 °C standardilämpötilaan.

Lähes jokaisella maalla ja laitevalmistajalla on omat, tiettyihin olosuhteisiin soveltuvat lämpötilakorjauskaavansa. Suomessa lämpötilan normalisointi tapahtuu ”Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelman” (TPPT) periaatteiden mukaisesti Spoofin & Petäjän (2000) PPL-menetelmäkuvauksessa esittämällä kaavoilla. Myös tämän työn yhteydessä sekä PPL- että TSD-taipumien Road Doctor -ohjelmassa tapahtuva lämpötilakorjaus hyödyntää näitä kaavoja. Road Doctor on tässä työssä laajasti hyödynnetty Roadscanners Oy:n kehittämä tierakenteiden diagnostiikka- ja suunnitteluohjelma, joka on erityisesti kehitetty mahdollistamaan eri tietoaaineistoja monipuolisesti yhdistelevät analyysit.

Korjatut taipumat saadaan kertomalla mitatut taipumat korjauskertoimella k:

$$d_{r,20} = k \times d_{r,T} \quad (2)$$

missä

$d_{r,20}$ = taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä +20 °C lämpötilassa

k = taipuman lämpötilakorjauskerroin

$d_{r,T}$ = taipuma etäisyydellä r mittauslämpötilassa

Korjauskerroin on laskettavissa taipumille $d_0 - d_{600}$. Tätä kauempana olevien antureiden taipumat voidaan korjata lasketuista tuloksista ekstrapoloimalla. Taipuma d_0 :lle TPPT-menetelmän mukainen korjauskerroin on esitetty kaavassa 3:

$$k = 1 - (T - T_{cal}) \times (0,0000975 \times h) \quad (3)$$

missä

T = mittauslämpötila

T_{cal} = tavoitelämpötila (+20 °C)

h = päällystepaksuus

Muille taipumille ohjelma käyttää kaavaa:

$$k = 1 - (T - T_{cal}) \times (Val \times h) \quad (4)$$

missä muuttujan Val arvo lasketaan kaavalla:

$$Val = 0,0000001 \times 3764,9 \times (R^{-0,348}) \quad (5)$$

missä

$$R = \text{korjattavan geofonin etäisyys taipumakeskipisteestä, [mm]}$$

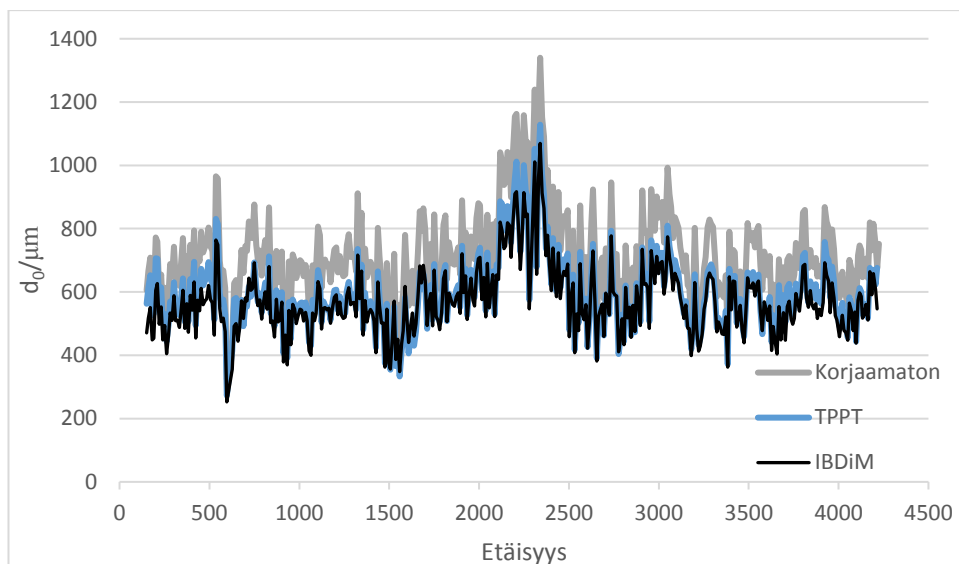
Taipuma kuormituspisteen alla (d_0 , maksimitaipuma, päätaipuma) kuvaa koko rakenteesseen ja pohjamaahan kuormituksen vaikutuksesta syntyvien pystysuuntaisten muodonmuutosten summaa. Muut eri etäisyyksillä kuormituspisteestä mitatut taipumat kuvaavat vastaavalla ekvivalenttisuveydellä sijaitsevan kerroksen taipumakäyttäytymistä. Näin ollen lämpötilakorjaus tuottaa suurempia korjauksia taipumille lähellä kuormituspistettä kuin syvempien ja lämpötilaltaan stabiilimpien kerrosten taipumia kuvaaville kaukotaipumille.

Road Doctorin lämpötilakorjauksen laskennassa on päädytty käyttämään mittauslämpötilana suoraan päällysteen pinnasta määritettyä pintalämpötilaa, mikäli päällysteen todellista sisälämpötilaa ei ole mitattu porareiästä. Ratkaisuun on päädytty, sillä lineaarinen päällysteen sisälämpötilan estimointi saattaa johtaa harhaan, mikäli lämpötilagradientin suuntaa ei tunneta (Maijala 2016). Lisäksi Suomessa päällysteet ovat tyypillisesti ohuita, jolloin lämpötilaero laatan pinnassa ja keskikohdassa jää pieneksi.

Puolalainen TSD-operaattori IBDiM puolestaan käyttää omissa analyyseissään hieman erilaista lämpötilakorjauskertoimen kaavaa (Sudyka 2016). Kaava on aavistuksen suomalaisista TPPT-menetelmäkuvauksen mukaista lämpötilakorjausmenettelyä yksinkertaisempi, jättäen muun muassa päällystepaksuuden vaikutuksen kokonaan huomiotta:

$$k = 1 + 0,02 \times (T_{cal} - T) \quad (6)$$

Menetelmien tuottamat korjatut taipumat eivät kuitenkaan eroa merkittävästi toisistaan (Kuva 11). TPPT-menetelmän mukainen päällystepaksuuden huomioiva korjauskerroin on keskimäärin 0,83 ja se korjasi esimerkin tieosan taipumia 122 μm alaspäin. IBDiM:n pelkästään lämpötilaeroon perustuva kaava puolestaan tuotti korjauskertoimen arvoksi keskimäärin 0,79; joka korjasi esimerkin taipumatasolla maksimitaipumaa keskimäärin 147 μm . Lähempänä standardilämpötilaa mitatuille taipumille ero on luonnollisesti vieläkin pienempi.



Kuva 11: Eri lämpötilakorjauskaavojen vaikutus TSD:llä mitattuun maksimitaipumaan. Esimerkki kantatien 77 tieosalta 1, mittaushetken keskimääräinen lämpötila on +30,3 °C.

Riittävän korkeassa lämpötilassa bitumisen sideaineen muodonmuutoskäyttäytyminen muuttuu elastisesta viskoplastiseksi. Mitä pehmeämmästä bitumista on kyse, sitä alhaisemmassa lämpötilassa muutos tapahtuu. Tämänkaltaisen kuormitusvasteen muutos ei ole lämpötilakorjauskertoimella kompensoitavissa, kuten ei myöskään erittäin alhaisen lämpötilan jäykistävä vaikutus. Näistä syistä PPL-menetelmäkuvausten mukaan taipumamittaukset tulisi Suomessa rajoittaa päällysteen lämpötila-alueelle +5 ... +30 °C (päällysteen pinnasta mitattuna 0 ... +35 °C) (Spoof & Petäjä 2000, s. 9). Lämpötilagradientin suunnasta riippuen pintalämpötilan ja päällysteen sisälämpötilan sallitut rajat eivät kuitenkaan välttämättä vastaa toisiaan, joten mittausajankohta ja lämpötilahistoria on aina syytä huomioida tarkasteluissa.

3.4 Taipumatuloksista laskettavat tierakenteen kuntoparametrit

Taipumien kuvaamaan tierakenteen mekaaniseen kuormitusvasteeseen perustuen on kehitetty erilaisia rakenteen kuntoa ja vaurioitumisriskiä ilmentäviä parametreja, jotka on perinteisesti laskettu PPL-taipumista, mutta samat parametrit ovat laskettavissa myös TSD-tulosten perusteella. Tässä työssä tarkasteltujen kuntoparametrien laskentaan on käytetty Roadscanners Oy:n Road Doctor -ohjelmaa.

Taipumamittausten tulosten hyödyntäminen on merkittävässä osassa niin tiestön vallitsevaa tilaa kuin tierakenteiden jäljellä olevaa käyttöikääkin arvioitaessa. Taipumista laskettaville parametreille on kokemusperäisesti määritetty kriittisiä rajoja, joiden ylityttyä tierakenne vaurioituu nopeasti. Niinpä taipumamittausten teettäminen osana väyläomaisuuden hallintaa on erittäin perusteltua: tulosten analyysillä, etenkin vertailemalla eri vuosien tuloksia, saadaan suuren vaurioitumisriskin kohteet paikannettua ja kunnostettua ennaltäehkäisevästi, ennen vakavien vaurioiden syntymistä.

Venymä

Päällysteen alapinnan pituussuuntainen vetomuodonmuutos, eli venymä, on hyvä päällysteen väsymisen ja väsymisvaurioitumisriskin indikaattori. Päällysteen väsyminen raskaiden akselien toistuvien ylityskertojen seurauksena on yksi merkittävimmistä tierakenteen vaurioitumiseen johtavista tekijöistä, mikä tekee parametrusta erittäin käyttökelpoisen työkalun päällysteiden diagnostiikassa.

Yleisellä tasolla venymä tarkoittaa kappaleen pituuden muutosta suhteessa sen alkuperäiseen pituuteen. Päällysteen alapinnan venymän (ϵ_a) Road Doctor -ohjelma laskee Ruotsin tieviranomaisen Trafikverketin (entinen Vägverket) kehittämällä kaavalla (6). Venymän yksikkönä käytetään mikrostrainia [$\mu\epsilon$].

$$\epsilon_a = 37,4 + 0,988 \times d_0 - 0,553 \times d_{300} - 0,502 \times d_{600} \quad (6)$$

missä

d_r = taipuma etäisyydellä r [mm] kuormituspisteen etupuolella

Kaava antaa venymän lämpötilakorjaamattoman arvon. Koska bituminen sideaine viskoelastisena materiaalina tekee asfalttipäällysteen muodonmuutosominaisuuksista lämpötilariippuvaisia, käytetään analyyseissä tulosten vertailtavuuden parantamiseksi lämpötilakorjattuja arvoja. Koska parametri on ruotsalaisten kehittämä, tehdään lämpötilakorjaus Suomessakin venymän osalta Ruotsissa standardilämpötilana käytettyyn $+10\text{ °C}$ lämpötilaan. Lämpötilakorjatun venymän ($\epsilon_{a,10}$) Road Doctor laskee korjaamattomasta arvosta niin ikään Trafikverketin kaavalla (7).

$$\epsilon_{a,10} = \frac{\epsilon_{a,T}}{\left(\frac{T}{10}\right)^{3,08 \times 10^{-8} \times h^2 \times d_0}} \quad (7)$$

missä

T = päällysteen mittauslämpötila

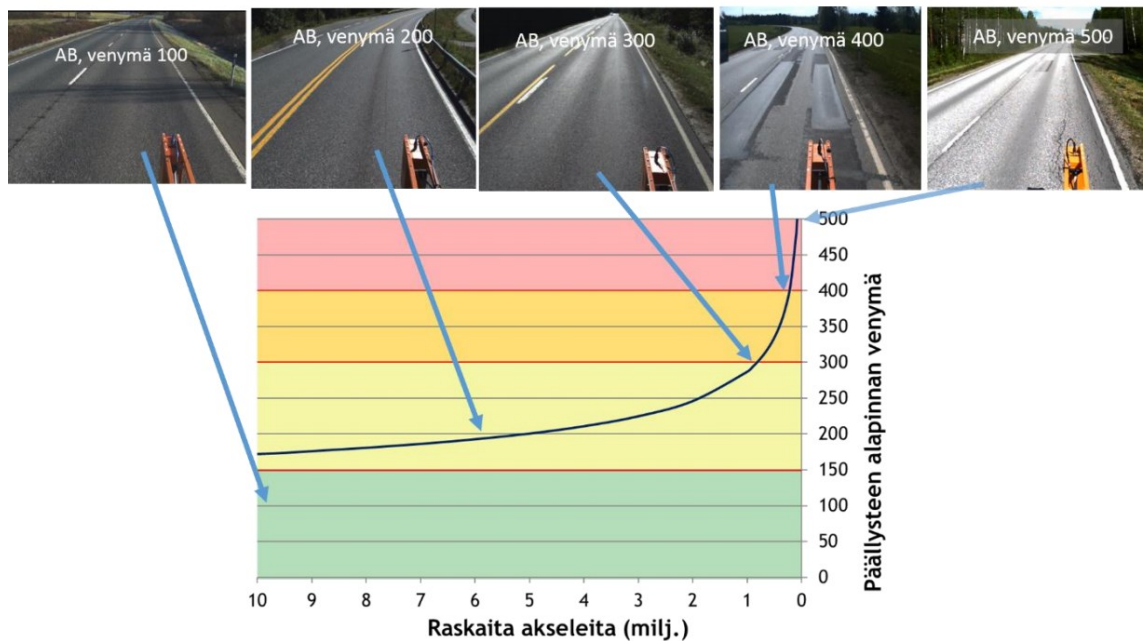
h = päällystepaksuus, [mm]

Taulukko 1 esittää PEHKO-projektissa käytetyt venymäluokat rajoineen. Päällysteiden erilaisesta väsymiskestävyydestä johtuen rajat ovat erilaiset jäykemmille asfalttibetonille (AB) ja kivimastikiasfaltille (SMA) kuin pehmeille asfalttibetoneille (PAB):

Taulukko 1: PEHKO-projektin analyyseissä käytetty venymän luokittelu eri päällystelaaduilla (muokattu: Roadscanners Oy)

	AB/SMA rajat	PAB-rajat
Erinomainen	< 100	< 200
Hyvä	100 – 200	200 – 300
Tyydyttävä	200 – 300	300 – 450
Hälyttävä	300 – 450	450 – 600
Vaurioitunut	450 – 600	600 – 800
Menetetty	> 600	> 800

Kuva 12 esittää periaatteellisesti venymän ja rakenteen jäljellä olevan käyttöiän yhteyden ja kuvia esimerkkikohteista. Kuvaajasta nähdään, että noin 300 µε jälkeen väsyminen alkaa kiihtyä voimakkaasti, ja jo suhteellisen harvalukuiset raskaiden akselien ylityskerrat johtavat venymien voimakkaaseen kasvuun. Korkean venymätason kohteille tyypillistä on ikääntynyt päällyste, johon syntyneet vauriot johtavat koko rakenteen kunnon nopeaan heikkenemiseen. Vaurioituminen kiihtyy, kun halkeillut päällystelaatta ei enää kykene jakamaan kuormituksia tasaisesti, vaan päällysteen epäjatkuvuuskohdissa purkautuvat liikennekuormitukset aiheuttavat rakenteeseen suuria yksittäisiä kuormituspiikkejä.



Kuva 12: Venymän yhteys AB-päällysteen jäljellä olevaan käyttöikään ja esimerkkikuvia tiestöltä (Roadscanners Oy).

SCI

SCI eli pintakantavuusindeksi (Surface Curvature Index) on tierakenteen pintaosan, eli sidottujen kerrosten ja kantavan kerroksen yläosan, taipumamuotoa kuvaava parametri. SCI-arvon perusteella voidaan arvioida riskiä pysyvien muodonmuutosten syntymiselle parametrin kuvaamassa kerroksessa (Taulukko 2). SCI-arvo lasketaan mitattujen taipumien erotuksena kaavalla:

$$SCI = d_0 - d_{200} \quad (8)$$

Käytännössä SCI siis kertoo, kuinka suuren taipuman 50 kN kuormitus aiheuttaa tien pinnan ylimpään 200 mm kerrokseen. Tierakennetta tyypin 1 urautumiselle altistavien leikkausjännitysten kannalta kriittisin syvyys rakenteessa on likimain kolmannes rengasleveydestä, eli noin 150 mm tien pinnan alapuolella (www.roadex.org). Näin ollen korkea SCI-arvo on hyvä indikaattori tyypin 1 urautumisriskille.

SCI-arvoja on käytössä kahdenlaisia. Suomen ohutpäällysteisellä tiestöllä soveltuu paremmin käytettäväksi d_{200} -taipumasta laskettu arvo, johon SCI:llä tämänkin työn yhteydessä viitataan. Maailmalla voidaan vaihtoehtoisesti käyttää myös d_{300} -taipumasta laskettua SCI-arvoa. SCI:tä käyttäessä onkin tärkeää ilmoittaa, kummasta taipumasta arvo on laskettu.

SCI-arvot ovat venymän tavoin lämpötilariippuvaisia. Käytännössä lämpötilakorjattujen SCI-arvojen laskenta tapahtuu sijoittamalla kaavaan (8) lämpötilakorjatut taipumat, jotka Suomessa normalisoidaan kappaleessa 3.3 esitetyllä menetelmällä + 20 °C tavoitelämpötilaan. Myös laitevalmistajan ohjelma laskee SCI-arvon suoraan TSD-taipumien perusteella. Tuo arvo on kuitenkin lämpötilakorjaamaton, eikä sen vuoksi kovinkaan käyttökelpoinen muuta kuin yksittäisen kohteen eri osien vertailussa.

Taulukko 2 esittää PEHKO-projektin analyyseissä käytetyn SCI-arvojen luokittelun.

Taulukko 2: PEHKO-projektin mukainen SCI-arvojen luokittelu (muokattu: Roadscanners Oy)

	SCI-rajat
Erinomainen	< 100
Hyvä	100 – 200
Välttävä (ongelmia)	200 – 250
Huono	250 – 400
Erittäin huono	> 400

BCI

Kaavalla (9) laskettavaa BCI-arvoa käytetään kuvaamaan riskiä liikennekuormituksen aikaansaamien pysyvien muodonmuutosten syntymiseen tierakenteen alaosassa ja pohjamaassa. Alhainen BCI indikoi, että liikennekuormituksen aiheuttamat jännitykset pysyttelevät alusrakenteen sietämällä tasolla, eikä rakenteeseen synny liikennöinnin seurauksena vaurioita. Kohonnut BCI puolestaan kuvaa kasvanutta tyypin 2 urautumisriskiä.

Syitä korkeaan BCI-arvoon voivat olla joko pehmeästä pohjamaasta aiheutuvat kantavuuspuutteet tai liian ohuet, materiaaaliltaan heikkolaatuiset ja huonosti kuormituksia jaksavat rakennekerrokset.

$$BCI = d_{900} - d_{1200} \quad (9)$$

Aivan ensimmäisillä TSD-laitteilla kerätyn taipumatiedon perusteella ei kaukotaipumista laskettavaa BCI-arvoa saanut sensoreiden lukumäärän ja sijoittelun vuoksi määritettyä. Laitevalmistajan ohjelmisto ei tarjoa sitä valmiiksi laskettuna vielääkään, vaikka se on osoittautunut erittäin käyttökelpoiseksi tunnusluvuksi.

BCI ei syvempien kerrosten käyttäytymistä kuvaavana parametrina ole ainakaan teoriassa samalla tavoin lämpötilasensitiivinen kuin venymä ja SCI, joihin sidotun kerroksen lämpötilavaihtelut saattavat vaikuttaa suurestikin. Näin ollen BCI voidaan laskea suoraan lämpötilakorjaamattomista taipumista ilman merkittävää virhettä.

Taulukko 3 esittää BCI-arvojen PEHKO-projektin mukaisen luokittelun. Vielä BCI-arvon ollessa vain hieman yli 40 vaaditaan vaurioiden syntymiseen huomattava määrä raskasta liikennettä, eikä tilanne vähäliikenteisemmillä teillä ole vielä läheskään kriittinen. Vasta arvon ylittäessä 60 on riski vaurioitumiselle selkeästi koholla jo varsin vähäisellä raskaan liikenteen määrällä ja yli 80 tasolla on rakenteeseen syntynyt jo voimakkaita reuna- ja painumia.

Taulukko 3: PEHKO-projektin mukainen BCI-arvojen luokittelu (muokattu: Roadscanners Oy)

	BCI-rajat
Erinomainen	< 10
Hyvä	10 – 30
Tyydyttävä	30 – 40
Välttävä (ongelmia)	40 – 60
Huono	> 60

E2-moduuli

E2-moduuli on Suomessa kehitetty koko tierakenteen keskimääräistä pintakantavuutta kuvaava moduuliarvo, joka dynaamisista taipumamittauksista laskettuna vastaa likimain staattisen levykuormituskokeen tuloksena saatua rakenteen toistokuormituksen jäykkyyttä. Tunnusluvun kehittämisen taustalla onkin ollut halu linkittää staattisen ja dynaamisen kuormitusvastemittauksen tulokset. E2-moduuli ei kerro mitään yksittäisten rakennekerrosten ominaisuuksista tai muodonmuutosmoduuleista, vaan niiden määrittäminen tehdään erikseen. E2-arvon laskentaan Road Doctor käyttää kaavaa:

$$E2 = \frac{1000 \times f \times (1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times a}{d_0} \quad (10)$$

missä

ν = Poisson luku

σ_0 = kuorma, [MPa]

a = kuormituslevyn halkaisija

f = kerroin, joka saa arvon 2 kun kuormituslevy on jaettu, muulloin $f = \pi/2$

E2-moduulin laskenta ei huomioi päällysteen lämpötilan aiheuttamaa jäykkyyden muutosta, vaan tulos kuvaa ainoastaan tilannetta mittaushetkellä vallitsevissa olosuhteissa. Arvo ei sovellukaan eri aikoina mitattujen kohteiden absoluuttisiin vertailuihin, vaan sen käytettävyys perustuu lähinnä tarkasteltavan kohteen rakenteellisesti heikompien ja vahvempien jaksojen nopeaan erottelamiseen. Arvon käytettävyyteen liittyen on kokemusperäisesti havaittu, että lähelle tienpintaa tuleva kallio vääristää E2-moduulin arvoja paremmiksi kuin tierakenteen todellinen kuormituskestävyys edellyttäisi.

Pohjamaan moduuli

Road Doctorin Bearing Capacity Analyses -työkalulla on mahdollista laskea tien alapuolisen pohjamaan sekä alusrakenteen kantavuutta kuvaavan ε_u -moduulin arvo. Tunnusluku laskentakaavoineen (11) on edellä esitellyn venymäkaavan tavoin Ruotsin tieviranomaisen kehittämä:

$$\varepsilon_u = \frac{5200}{d_{900}^{1,5}} \quad (11)$$

Myös suureen tunnus periytyy suoraan Ruotsissa vakiintuneesta merkintätavasta. Tyypillisesti ε -symbolia käytetään viittaamassa venymäarvoon tai dielektrisyyteen, mutta epäloogisuudesta huolimatta merkintätapa on jäänyt käyttöön myös Suomessa.

Tarkkaan ottaen ε_u -moduuli ei ole puhdas pohjamaan moduuli, vaan se kuvaa jännityksen ja muodonmuutoksen suhdetta vakiosyvyydellä (noin 0,9 m) tien pinnasta. Rakennepaksuudesta riippuen kyseessä on siis vaihtelevasti pohjamaan, pengermateriaalin tai päällysrakenteen alaosan moduuliarvo.

3.5 TSD- ja PPL-menetelmien käytettävyys

Kuten kappaleessa 3.2 (Kuva 7) todettiin, on teiden rakenteellista kuntoa ja kuormituskestävyyttä mittaaville menetelmille yleisesti asetettu tiettyjä vaatimuksia. Ehkä eräänä keskeisimpänä niistä on tarve saada kerättyä tietoa tieverkolta mahdollisimman kattavasti ja kustannustehokkaasti. Tässä mielessä TSD on liikennevirran nopeudella etenevänä ja käytännössä jatkuvaa taipumatietoa tarjoavana mittalaitteena ylivoimainen perinteiseen paikaltaan mittaavaan pudotuspainolaitteeseen verrattuna. Samalla on muistettava, että PPL:n kuormitusmekanismi kykenee vain rajoitetusti mallintamaan todellisia raskaan liikenteen tierakenteeseen kohdistamia rasituksia.

Pudotuspainolaitteeseen liittyviä erityiskysymyksiä

Tien päällysrakenteen taipumaominaisuudet muuttuvat väsymisen ja vaurioiden kehittymisen myötä, eikä kerätty taipuma-aineisto näin ollen säily ajantasaisena kovinkaan kauaa, toisin kuin esimerkiksi maatumalla määritetyt rakennekerrospaksuudet. Lisäksi

suunnittelun lähtötiedoksi kerätty hankekohtainen taipumatieto vanhennee luonnollisesti heti kunnostustöiden valmistuttua, eikä näin ollen palvele pidemmän ajan omaisuudenhallinnan tarpeita lainkaan. Niinpä mittausmenetelmien tehostaminen on välttämätöntä, mikäli taipumatiedon käyttöä koko tieverkon kunnonhallinnassa halutaan edistää. Jo Tiehallinnon (2005, s. 4) laatimassa verkkotason taipumamittausten tarveselvityksessä todetaan, että mikäli tierakenteen taipumia halutaan mitata verkkotasolla, se on käytännössä mahdollista ainoastaan jatkuvatoimisella taipumanmittauslaitteella, joita ei raportin laatimisaikaan ole ollut tuotantokäytössä. Tulevaisuuden tienpidon tarpeet edellyttävät toisaalta mittaus tietoa entistä kattavammin koko verkolta, mutta toisaalta entistä yksityiskohtaisemmin yksittäisiltä tiekohteilta, jotta sekä kokonaisvaltaisen omaisuudenhallinnan että entistä pienipiirteisemmän kunnostustoimien suunnittelun vaatimukset täyttyvät.

Toki myös pudotuspainolaitteiden kehitystyössä on viime aikoina panostettu menetelmän tehokkuuden kasvattamiseen. Esimerkiksi merkittävä laitevalmistaja Dynatest on lanseerannut nopean pudotuspainolaitteen (engl. FastFWD), jonka yhteen pudotukseen käyttämä aika on valmistajan mukaan vain viidesosa tavallisen PPL:n vastaavasta (www.dynatest.com). Menetelmän nopeutta ei kuitenkaan kyetä rajatta kasvattamaan, eikä pysähtelevän mittalaitteen muulle liikenteelle aiheuttamaa häiriötä täysin välttämään, koska PPL-mittauksessa kuormituksen ja taipumien rekisteröinnin on menetelmän luonteesta johtuen tapahtuttava aina mittalaitteen seistessä paikallaan.

PPL-menetelmän heikohkon työsaavutuksen vuoksi vähänkään laajamittaisemmissa tutkimuksissa mittauspisteiden tiheys jää väkisin alhaiseksi, mikä saattaa olla ongelmallista varsinkin pohjasuhteiden tai tien rakenteen vaihdellessa voimakkaasti. Jatkuvatoimisella mittalaitteella saadaan kaikki rakenteellinen vaihtelu huomioon.

Myös turvallisuusnäkökohdat puhuvat jatkuvatoimisen, liikennevirran nopeudella tapahtuvan mittauksen puolesta. Pysähtelevä mittalaite aiheuttaa haittaa muulle liikenteelle ja vaarantaa työ- ja liikenneturvallisuutta, etenkin vilkasliikenteisillä teillä tai tiegeometrian rajoittaessa näkemiä. Toki PPL-menetelmän työturvallisuutta on parantanut merkittävästi laitteiston automatisoituminen, jonka myötä mittajaan ei enää tarvitse nousta mittalaitetta vetävästä autosta kullakin mittauspisteellä. Myös turva-autoja voidaan olosuhteiden vaatiessa käyttää ja joudutaankin käyttämään aina kaksiajorataisilla teillä. Turva-auton käyttö toki vähentää mittauksen riskiä ja parantaa liikenneturvallisuutta, mutta on toisaalta merkittävä kustannustekijä.

TSD:n käytön reunaehdot

TSD:n optisesti tapahtuva taipumien rekisteröinti asettaa mittausmenetelmän käytettävyydelle joitakin rajoitteita. Ensinnäkin menetelmä toimii vain päällystetyillä teillä, joten sorateiden taipumamittaukset eivät PPL:sta poiketen onnistu lainkaan TSD:llä.

Toisekseen märkä tai kostea tienpinta saattaa johtaa pinnan heijastusominaisuuksien muuttumiseen ja edelleen virrehavaintoihin. Tosin lähes kaikki muutkin väylämittaukset on suositeltavaa tehdä päällysteen pinnan ollessa mahdollisimman kuiva. Tämä koskee niin maatutkausta, laserkeilausta, palvelutasomittausta (PTM), useimpia visuaalisia inventointeja kuin PPL-mittauksia.

Flintschin et al. (2011, s. 15) mukaan myös uusi sideainepitoinen päällyste saattaa häiritä TSD:n laserantureiden toimintaa. Ilmiö selittyy päällysteen pintaan nousseen sideaineen sirontaa aiheuttavalla vaikutuksella. Tällöin lasersäde ei heijastu riittävässä määrin tien pinnasta takaisin anturiin (Baltzer et al. 2010). Käytännön kokemusten mukaan tienpinnan heijastusominaisuudet normalisoituvat muutaman kuukauden liikennöinnin jälkeen, kun ylimääräinen sideaine on kulunut pois tien pinnasta. Niin ikään tien voimakas pölyäminen saattaa heikentää TSD-tulosten luotettavuutta häiritsemällä lasersäteen kulkua.

Taipumien optisen rekisteröinnin asettamien rajoitusten lisäksi TSD-mittalaitteisto on melko suurikokoinen, joten sen käyttäminen alemman tieverkon geometrialtaan pienipiirteisillä teillä tai esimerkiksi kaupungin katuverkolla voi olla tilan puutteen ja vähimmäismittausnopeuden vaatimusten vuoksi paikoitellen hankalaa. Kapea tien poikkileikkaus, jyrkkä sivukaltevuus sekä tien huonosta kunnosta johtuva huomattava epätasaisuus saattavat myös osaltaan heijastua epätarkkuuksina jatkuvan taipumamittauksen tuloksiin.

Eräs mielenkiintoinen seikka on, että TSD:n kuormittavalla akselilla on valittu käytettäväksi paripyörää, vaikka yksittäispyörä on yleistynyt raskaassa kalustossa viime aikoina merkittävästi. Yksittäispyörän aiheuttama jännityspiikki on etenkin päällysrakenteen yläosassa huomattavasti keskitetympi ja intensiteetiltään suurempi kuin vastaavalla akselimassalla kuormitetun paripyörän (Kolisoja et al 2014). Näin ollen paripyörällisellä mittalaitteella saatetaan saada aavistuksen verran optimistisempi kuva tierakenteen kuormituskäyttäytymisestä kuin mitä saataisiin, jos kuormitus tapahtuisi yksittäispyörän välityksellä. Tosin valintaa puoltaa se, että yksittäispyörällä ensimmäinen laseranturi jouduttaisiin sijoittamaan pituussuunnassa huomattavasti nykyistä kauemmas kuormituspisteen eteen, jolloin maksimitaipuman määrittäminen hankaloituisi.

Lukemattomien muiden mittaus- ja laskentamenetelmien tavoin TSD-menetelmän teoreettiseen taustaankin liittyy joitakin yksinkertaistuksia. TSD-teoria pohjautuu oletukseen rakenteen elastisuudesta, vaikka tosiasiallisesti tierakenteen käyttäytyminen on viskoelastista. Normaalitylanteessa yksinomaan kuormituspisteen etupuolelta tapahtuva taipumamittaus ei tarjoa tietoa rakenteen palautumasta eikä palautumisnopeudesta kuormituksen poistuttua. Seuraaviin rakennettaviin mittausajoneuvoihin ollaan kuitenkin sijoittamassa mitta-antureita pysyvästi myös kuormituspisteen takapuolelle (Saarenketo 2017). Näin rakenteen todellisesta kuormitusvasteesta saadaan tulevaisuudessa entistä monipuolisemmin tietoa.

Menetelmien soveltuvuus

Yhteenvetona pistemäisen ja jatkuvatoimisen taipumamittausmenetelmän käytettävyyden arvioinnista voidaan todeta TSD:n olevan erittäin tehokas työkalu tieverkkotason tiedonhankintaan. Toki TSD-menetelmä soveltuu, ja sitä käytetäänkin, myös projektikohtaisiin tutkimuksiin. Suomessa hankekohtaista käyttöä rajoittaa ulkomailta tuotavan laitteiston ja henkilöstön saatavuus sekä laivauksesta aiheutuva merkittävä lisäkustannus. Pudotuspainolaitteita sitä vastoin on maassamme käytössä useilla alan toimijoilla, joten niiden saatavuus on jatkuvasti kohtalaisen hyvä.

TSD:n puolesta puhuu lisäksi jatkuvana saatava taipumatieto. Vaikka jatkuvaan aineistoon väkisinkin pääsee mukaan jonkin verran kohinan aiheuttamia virrehavaintoja, tunnistaa jatkuvatoiminen mittaus silti tierakenteen ja pohjamaan ominaisuusvaihtelut paremmin kuin pistemäisesti tehtävä taipumamittaus, jonka harva mittauspisteväli väkisinkin kätkee osan vaihtelusta. Tulevaisuudessa nykyinen taipumamittausten 50 metrin mittauspisteväli ei ole enää edes projektitasolla riittävä tarjoamaan tietoa pistemäisten ongelmien diagnostiikkaan ja vain joidenkin kymmenien metrien matkalle ulottuvien kunnostustoimenpiteiden suunnitteluun.

TSD ei kuitenkaan täysin pysty syrjäyttämään perinteistä pudotuspainolaitetta, koska se ei sovellu käytettäväksi sorateilla. Lisäksi TSD-mittausajoneuvon suuri koko rajoittaa menetelmän käyttöä päällystetynkin verkon vähäliikenteisimmillä teillä, eikä laitteisto kokonsa vuoksi sovellu myöskään esimerkiksi painorajoitetun tiestön kelirikkoaikaisiin kevätkantavuuden mittauksiin.

4. TUTKIMUSKOHTEET

4.1 PEHKO-projektin pilottikohteet

PEHKO-projektin tutkimuskohteiksi on valittu Keski-Suomen ELY-keskuksen alueelta Karstulan hoitourakka-alue sekä Lapin ELY:n alueelta Kemi-Tornion hoitourakan alue. Lisäksi Lapin PEHKO-aineisto käsittää Rovaniemen ympäristön kantatiet sekä valtatie 4 pohjoisessa aina Vikajärvelle saakka. Yhteensä projektin puitteissa on Keski-Suomessa ja Lapissa tehty kappaleessa 4.2 esiteltyjä tutkimuksia 1653 tiekilometrillä.

TSD-mittaukset on valta-, kanta- ja seututeillä tehty erikseen tieosoitteen kasvu- ja las-
kusuunnissa. Yhdysteillä mittaus on tehty vain yhteen suuntaan. Aivan kaikilla teillä TSD-mittauksia ei ole voitu tehdä tien kapeuden tai huonon kunnan vuoksi. Näiden kantavuus on määritetty PPL-mittauksin. Samoin on menetelty myös tutkimusohjelmaan sisällytettyjen sorateiden kanssa. PPL-mittauksia on lisäksi teetetty jonkin verran TSD:llä mitatuilla tieosilla vertailuaineiston saamiseksi. Tätä vertailuaineistoa hyödynnetään kappaleessa 6.2.

PEHKO-projektin TSD-mittaukset on aloitettu Keski-Suomessa kesä – heinäkuun vaihteessa 2015. Lappiin mittauskalusto on siirtynyt muutamaa päivää myöhemmin ja mittaukset on saatu päätökseen heinäkuun puolivälissä. Mittauksia on tehty rakenteellisesti monenlaisilla teillä ja vaihtelevilla pohjamailla. Mitattujen teiden joukkoon mahtuu myös teräsverkoilla vahvistettuja kohteita, joten analysoitavana on monipuolinen TSD:llä mitattu aineisto.

4.1.1 Keski-Suomi

Karstulan alueelta on PEHKO-projektin toimintasuunnitelma-asiakirjan mukaan mitattu 194 km pääteitä (käsittäen osia valtateistä 13 ja 16 sekä kantateistä 58 ja 77). Tämän lisäksi alemman verkon kohteita on alueelta valikoitu siten, että yhteensä mitattuja teitä on 401 km.

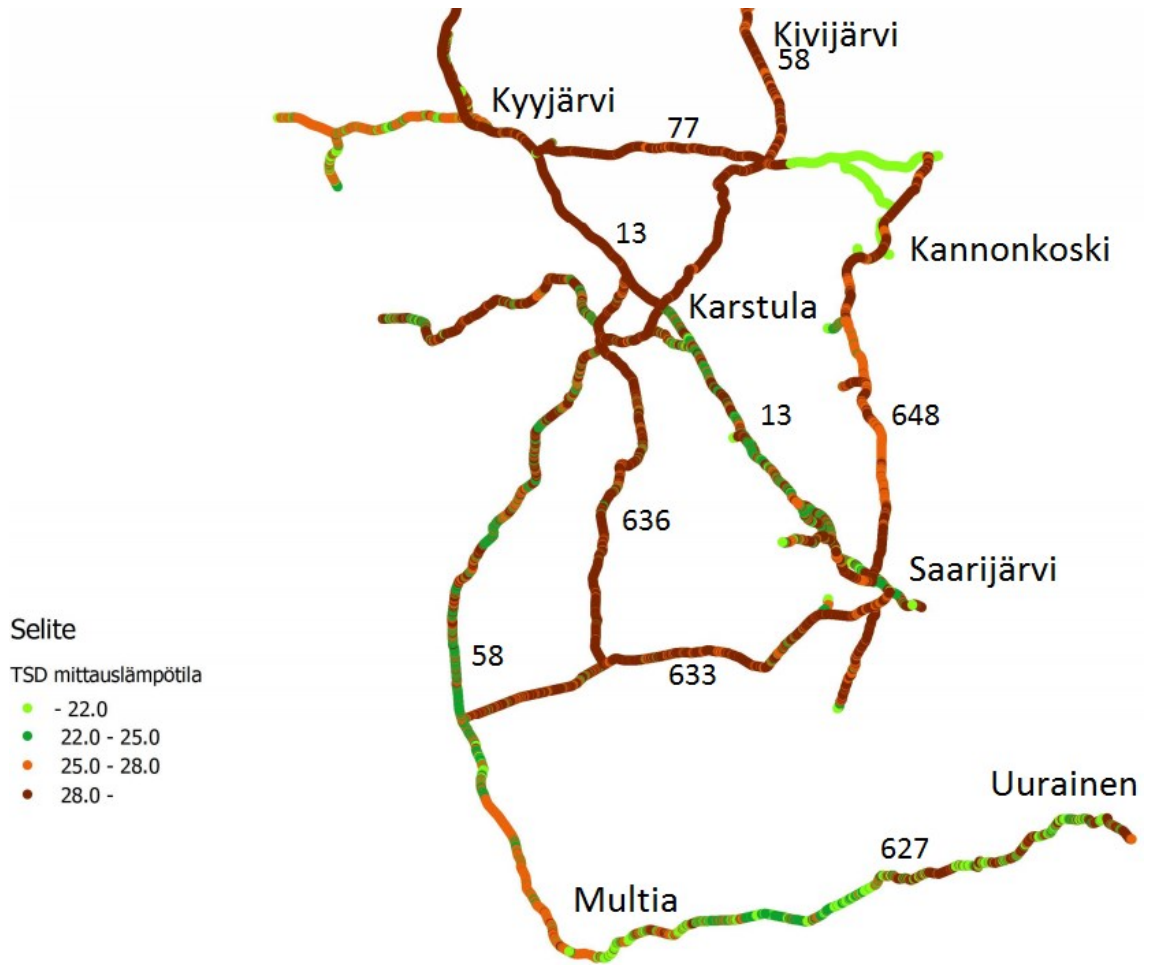
Karstulan hoitourakka-alue sijaitsee Keski-Suomessa Jyväskylän luoteispuolella aivan Etelä- ja Keski-Pohjanmaan maakuntien rajalla. Alueen maantieteellinen sijainti ja raja-
aus on esitetty karttakuvassa (Kuva 13).



Kuva 13: Keski-Suomen PEHKO-alue (PEHKO-projektin toimintasuunnitelma).

PPL-vertailumittauksia on alueella tehty yhteensä noin 13 kilometrin matkalla. Kohteet sijoittuvat viidelle tieosalle kantateillä 58 ja 77.

Keski-Suomen TSD-mittaukset on tehty pääosin erittäin helteisissä sääoloissa. Päällyste-
teen pinnasta mitattu keskimääräinen pintalämpötila on monilla tieosilla noussut jopa yli
+ 30 °C. Karttakuvaan (Kuva 14) on koottu mittaushetkisiä päällyste-
teen pintalämpötiloja Karstulan PEHKO-alueella.



Kuva 14: Päällysteen pintalämpötiloja Karstulan PEHKO-alueen TSD-mittauksissa.

4.1.2 Lappi

Lapista projektissa on mukana päätiestöä Kemi-Tornion alueelta 190 km ja lisäksi Rovaniemen ympäristöstä 328 km. Nämä koostuvat osista valtateitä 4, 21 ja 29 sekä kantateitä 78, 79, 81, 82 ja 83. Lisäksi mukana on seutu- ja yhdystiekohteita Kemi-Tornion alueelta siten, että Lapin ELY-keskuksen alueella projektiin kuuluvan tiestön kokonaispituus on 1252 tiekilometriä. Tutkimusalueen maantieteellinen rajaus on esitetty kartalla (Kuva 15).



Kuva 15: Kemi-Tornion hoitourakka-alue sekä Rovaniemen ympäristön päätiet (PEHKO-projektin toimintasuunnitelma).

Lapin tutkimusalueella PPL-vertailumittauksia on tehty kolmella tiellä. Yhteenveto tutkimuksen TSD-PPL -vertailutulosista keskimääräisine päällystepaksuuksineen on esitetty taulukossa (Taulukko 4).

Taulukko 4: TSD-PPL -vertailutulosat.

	Tie	Tieosa	Pituus [m]	Päällyste [mm]
Keski-Suomi	58	26	2544	45
		27	288	45
		38	4506	vaihtelee
	77	1	4233	165
		4	1482	140
Lappi	923	1	5143	68
		2	7551	51
		3	4677	44
		4	osittain	47
		8	osittain	40
	924	1	6100	100
	19538	1	6225	40

Lapissa TSD-mittaukset on viety läpi huomattavasti viileämmässä säässä kuin Keski-Suomen tutkimusalueella. Keskimääräinen pintalämpötila mitatuilla teillä on vaihdellut pääosin 15 – 20 lämpöasteen välillä. Sekä Lapissa että Keski-Suomessa PPL-mittaukset on tehty myöhemmin syksyllä.

4.2 PEHKO-projektissa hyödynnetyt tutkimusmenetelmät

PEHKO-projektin puitteissa hyödynnetään tiestön diagnostiikassa uusimpia ainetta rikkomattomia rakenteiden tutkimusmenetelmiä. Pilottiprojektissa mukana olevalla tiestöllä

tehdään kymmenvuotisen projektin aikana kolme laajaa mittauskierrosta, joista ensimmäinen on tehty kesällä 2015 ja kaksi muuta ajoittuvat vuosille 2020 ja 2025. Näiden lisäksi tehdään välivuosina suppeampia seurantatutkimuksia.

Laaja mittauskierros käsittää TSD-taipumamittausten lisäksi Road Doctor Survey Vanilla (RDSV) tehtäviä mittauksia. Nämä käsittävät teiden maatutka-, laserskanneri- sekä kiihtyvyyssanturimittaukset. RDSV-mittauksen yhteydessä kohteet myös videoidaan visuaalista tarkastelua varten. Taulukko 5 esittelee laajan mittauskierroksen sisältämät tutkimukset ja näiden perusteella saatavat tien rakenteellista kuntoa kuvaavat suureet.

Taulukko 5: PEHKO-projektissa hyödynnetyt tutkimusmenetelmät ja näistä saatavat tierakenteen kuntoa kuvaavat parametrit (muokattu: PEHKO-projektin suunnitelma-asiakirja).

Tutkimusmenetelmä	Tien kuntoa kuvaavat parametrit
Maatutka (maa- ja ilmastiantennit)	Päällystepaksuus Rakenteen kokonaispaksuus Päällysteen/kantavan kerroksen dielektrisyys, kosteus Teräsvetot
TSD	Päällysteen alapinnan venymä SCI BCI Kantavuus
3D kiihtyvyyssanturi	Pituussuuntainen epätasaisuus (IRI) Nopeat sivukaltevuuden vaihtelut (huojunta)
Laserskanneri + Inertiaaliyksikkö (IMU)*	Urasyvyys, maksimiura, painumat Urakasvu eri vuosien mittauksista Ojien syvyydet Reunapalteen Sivukaltevuus*
Visuaalinen inventointi	Päällystevauriot Kuivatusluokittelu Rummut

Käytetyistä tutkimusmenetelmistä maatutkauksen etuja ovat tierakenteesta saatava jatkuva pituusprofiili, josta pystytään melko luotettavasti tulkitsemaan rakennekerrospaksuudet, penkereet ja pohjamaan laatu. Lisäksi maatutkadatasta voidaan taajuusanalyysin ja dielektrisyysarvojen perusteella arvioida rakenteen kosteustilaa. Dielektrisyysarvo (Er) kuvaa rakenteessa olevan vapaan veden määrää ja on osoittautunut hyväksi materiaalin hienoaineen laadun ja kosteustilaherkkyuden indikaattoriksi (Kolisoja et al. 2001, s. 3 – 6). Lisäksi Er-arvon hajonnan perusteella voidaan jäljittää päällysteen halkeamia, myös mikrohalkeilua, joka ei vielä näy visuaalisessa inventoinnissa.

Kiihtyvyyssantureiden avulla saadaan määritettyä nopeuden muutokset ajan suhteen xyz-koordinaatistossa sekä kiertymisnopeudet kunkin akselin suhteen. Pituuskaltevuusarvoista saadaan tietyillä aallonpituuksilla laskettua muun muassa tien epätasaisuutta ku-

vaava IRI -arvo (tyypillisesti 10 m keskiarvo). Aallonpituuksien perusteella voidaan arvioida myös tasaisuusongelmien aiheuttajaa, joka voi olla esimerkiksi tien pinnan laatu tai routaheitto.

Laserskannauksen avulla tiestä ja sen ympäristöstä saadaan muodostettua pistepilvi. Koska eri materiaaleilla on erilaiset heijastusominaisuudet, voidaan ympäristöstä takaisin skanneriin heijastuvan lasersäteen remission perusteella tehdä eroa heijastavien pintojen välillä, ja tähän perustuen paikantaa esimerkiksi ajoratamaalaukset ja päällysteen reuna. Skannerilla mitatusta tien poikkileikkausprofiilista saadaan laskettua muun muassa urasyvytydet eri uramalleilla sekä sivuojan pohjan korkeusasema ja luiskakaltevuudet. Eri vuosien seurantomittausten perusteella laskettavan vuotuinen urakasvun avulla urautumisen kehittymistä on helppo seurata ja löytää tiestöltä jaksot, joilla urakasvu on nopeaa.

Käyttämällä laserskannerin yhteydessä inertiaaliyksikköä (engl. Inertial Measurement Unit, IMU), saadaan laserskannauksen tarkkuutta parannettua mittalaitteen vertikaalisen liikkeen vaikutuksia eliminoimalla. Näin tarkentuvaa laseraineistoa pystytään hyödyntämään esimerkiksi tien sivukaltevuusjärjestelyjen selvittämiseen. IMU on lisätty Road Doctor Survey Vanin varustukseen kesällä 2016, joten kesän 2015 PEHKO-mittauksissa sitä ei ole ollut käytössä.

Visuaalisia tarkasteluja voidaan tehdä joko paikan päällä maastossa tai jälkikäteen digitaalivideon tai valokuvien avulla. Visuaalisten tarkastelujen pohjalta tehdään teille päällystevaurioinventointi, eli tallennetaan tieto päällysteen halkeamien ja paikkausten laadusta ja sijainnista. Lisäksi videokuvan perusteella voidaan arvioida kuivatuksen toimivuutta ja esimerkiksi rumpujen sijaintia. Esimerkiksi rumpujen kunnosta puolestaan saadaan arvokasta tietoa maastokäyntien avulla.

5. TSD-AINEISTON ANALYYSI

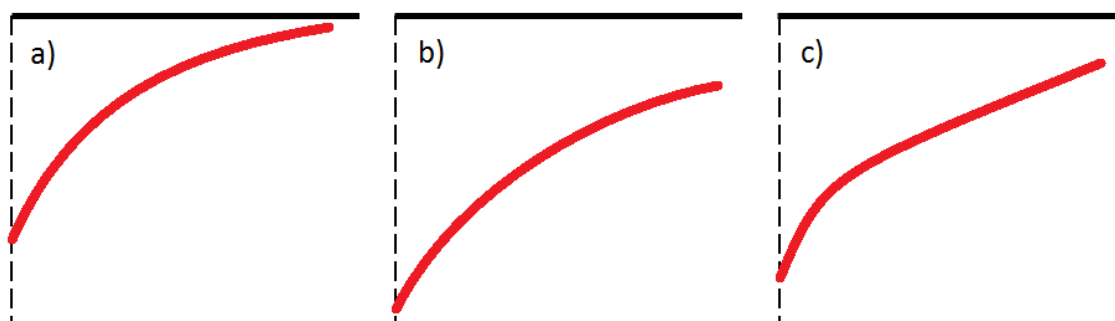
5.1 Taipuma

Tierakenteen mekaanista kuormitusvastetta kuvaava taipumatieto on keskeisin TSD-mittauksen tuottamista tuloksista. Taipumiin perustuen saadaan monipuolisesti tietoa tierakenteen erilaisista ominaisuuksista.

5.1.1 Taipumamuoto

TSD-mittauksen taipumatulosten perusteella saadaan kussakin mittauspisteessä määritettyjen taipumien perusteella muodostettua PPL:n taipumasuppiloa vastaava taipumakuvaaja. Taipumasuppilon muoto (Kuva 16) antaa viitteitä rakenteen eri osien muodonmuutosominaisuuksista perustuen aiemmin esiteltyyn teoriaan vastaavuudesta mitatun vasteen vaakaetäisyyden ja taipuvan rakennekerroksen syvyyden välillä.

Kuvaajien vaaka-akselilla on etäisyys kuormituspisteestä, pystyakselilla puolestaan taipuman suuruus. Taipuman 0-taso on vaaka-akselilla, joten mitä alemmas tästä taipumasuppilo jää, sitä suurempia ovat kuormituksen rakenteeseen aiheuttamat taipumat. Kuormituspiste sijaitsee origossa, joten taipuma vaaka-akselin nollakohdassa edustaa siis taipumaa suoraan kuormituspisteen alla. Tämä on rakenteen maksimitaipuma, d_0 .

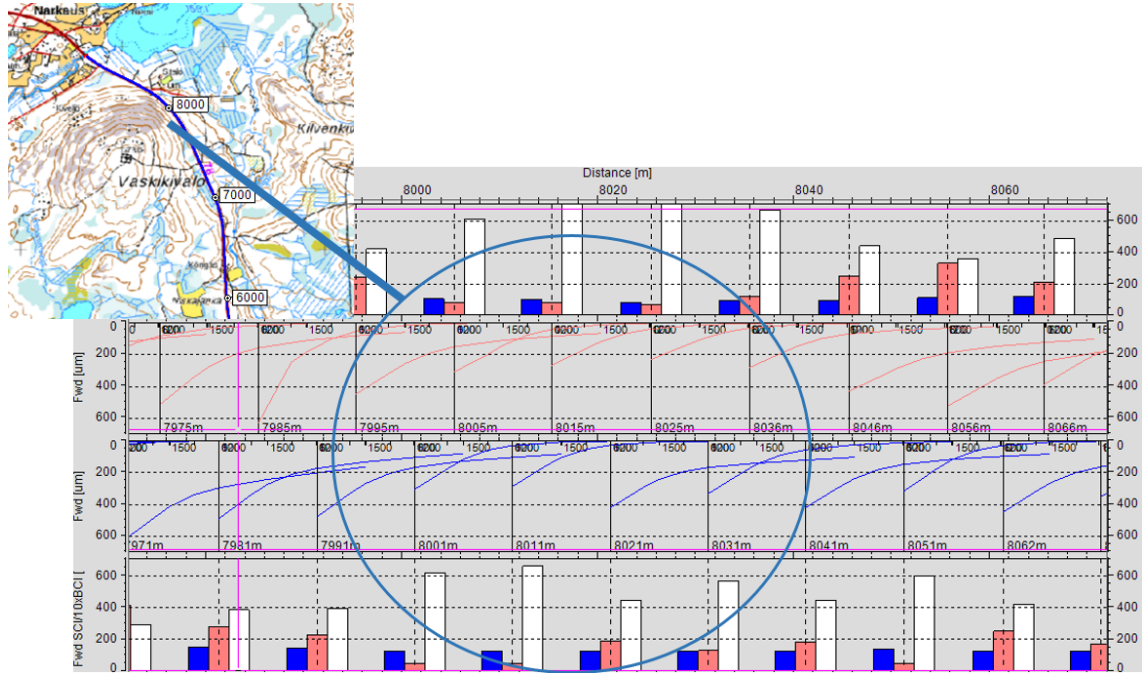


Kuva 16: Periaatteellisia esimerkkejä erityyppisistä taipumasuppiloista: a) tasaisesti kuormia jakava jäykähkö rakenne kantavalla pohjamaalla b) tasaisesti kuormia jakava taipuisahko rakenne pehmeällä pohjamaalla c) heikkolaatuinen päällyste/kantavan kerroksen yläosa.

Maksimitaipuma kuvaa koko tierakenteen sekä sen alapuolisen pohjamaan yhteenlasketua pystysuuntaista siirtymää kuormituksen seurauksena. Alhainen maksimitaipuma voi olla seurausta jäykistä, hyvin kuormitusta jakavista rakennekerroksista tai kantavasta pohjamaasta. Se voi myös indikoida esimerkiksi stabiloitua rakennetta.

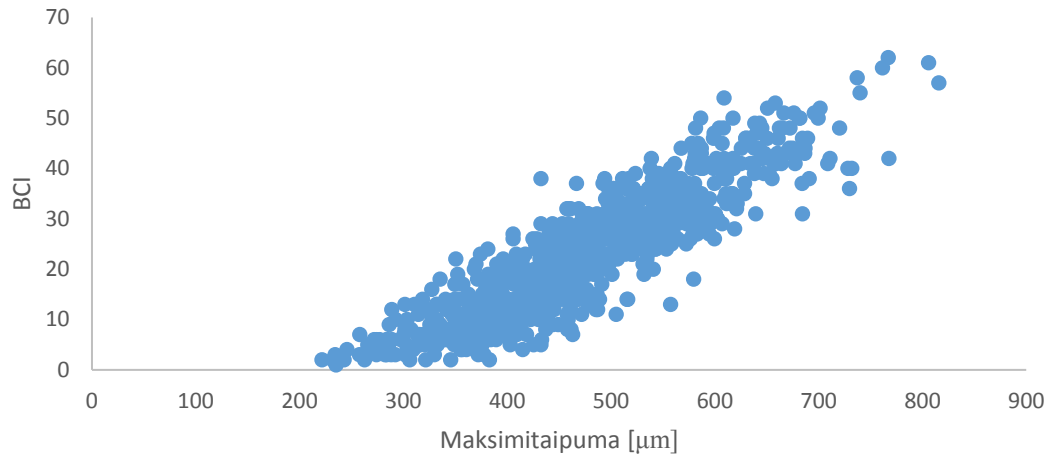
Esimerkistä (Kuva 17) nähdään kärjistäen erittäin kantavan pohjamaan vaikutus taipumasuppilon muotoon. Taipumakuvaajassa on esitetty 100 metrin jakso tien 78 tieosan 219

paaluväliltä 7970 – 8070. Paaluväli sijoittuu Vaskikivalon rinteelle. Kivalot ovat osa vaa-
raajonoa, jossa kallio on lähellä maanpintaa. Kallion läheisyyden paikallinen koko raken-
netta jäykistävä vaikutus nähdään taipumasuppiloiden muodon lisäksi myös erittäin al-
haisina SCI- ja BCI-arvoina. Lisäksi kuvassa on valkoisin pylväin esitetty koko rakenteen
keskimääräistä jäykkyyttä kuvaavat E2-moduulin arvot, joita tierakenteen alapuolinen
kallio saattaa kasvattaa jopa epärealistisen suuriksi, kuten edellä kappaleessa 3.4 todettiin.



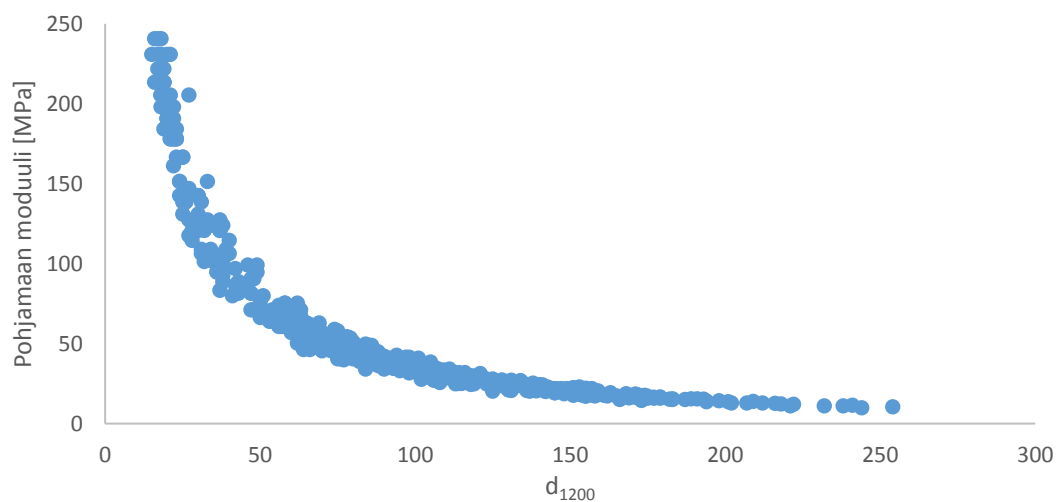
**Kuva 17: Kallioisen, jäykän maapohjan näkyminen TSD-taipumasuppiloiden muo-
dossa ja lämpötilakorjaamattomissa SCI-, BCI- ja E2-moduuliarvoissa. Kaksi alinta
riviä kuvaavat tieosoitteen kasvusuuntaa ja kaksi ylintä puolestaan laskusuuntaa. Pyl-
väskuvaajista sininen edustaa SCI-arvoa, punainen skaalauksen vuoksi kymmenellä
kerrottua BCI-arvoa ja valkoinen E2-moduulia kussakin laskentapisteessä 10 metrin
välein.**

Suomalaiselle tiestölle tunnusomaisilla ohuilla ja joustavilla rakenteilla päällysteen ja
muun päällysrakenteen yläosan vaikutus maksimitaipuman suuruuteen on vain vähäinen,
kuten havaitaan kantatien 78 tieosan 219 kuvaajasta, jossa on verrattu maksimitaipuman
ja BCI-arvon yhteyttä (Kuva 18). Kuvan esimerkissä taipumaa 900 – 1200 mm syvyy-
dellä kuvaava BCI-arvo selittää yli 80 % maksimitaipuman varianssista.



Kuva 18: BCI-arvon ja rakenteen maksimitaipuman välinen riippuvuus. Esimerkki kantatieltä 78 tieosalta 219.

Tasaisesti kaartuva taipumasuppilon muoto taas ilmentää tasaisesti taipuvaa rakennetta. Taipumasuppilon kaaren epäjatkuvuuskohdat (jyrkähköt kulmat) liittyvät puolestaan jäykkyysominaisuuksiltaan voimakkaasti poikkeaviin kerrosrajoihin, joita syntyy esimerkiksi heikkolaatuisen materiaalin käytön seurauksena. Kauimpana pystyakselin leikkauskohdasta sijaitseva taipumasuppilon yläpää kuvaa kaukotaipumien suuruutta, eli kuormituksen seurauksena kaikkein syvimmissä kerroksissa syntyvää palautuvaa muodonmuutosta. Yhteys kaavalla (11) laskettavan pohjamaan moduulin ja TSD:n d_{1200} -taipuman välillä näyttäytyykin varsin selkeänä (Kuva 19). Oikeastaan kuvaaja osoittaa d_{900} - ja d_{1200} -taipumien yhteyden, koska pohjamaan moduuli lasketaan d_{900} -taipumasta. Joka tapauksessa yhteys on varsin selkeä ja d_{1200} -taipumaa käytetäänkin pohjamaan maalajin arvioimiseen. Tämä perustuu kokemuseräiseen tietoon eri maalajien jäykkyysominaisuuksista.



Kuva 19: Taipuma 1200 mm:n etäisyydellä kuormituspisteestä antaa viitteitä pohjamaan moduulista. Esimerkki kantatien 78 tieosalta 219.

Kuvan alhaisimmat d_{1200} -taipumat ($< 100 \mu\text{m}$) liittyvät kitkamaalajeihin, joiden jäykkyyshmoduuli tyypillisesti on vähintään 50 MPa. Taipumat välillä 100 – 200 μm viittanevat silttiseen pohjamaahan, jonka tyypillinen moduuli kuivana on noin 25 MPa. Maaperäkartan ja videoanalyysin (puusto, paljastumat ym.) perusteella arviot maalajeista vaikuttavat uskottavilta.

Taipuman muotoparametrit

Taipumamuodolla tarkoitetaan päällystelaatan jäykkyyden suhdetta sitomattomien rakennekerrosten ja pohjamaan jäykkyyteen. Parhaiten taipumamuotoa kuvaa taipumamittauksessa määritetty taipumasuppilo. Moniin tarkoituksiin kätevämpi olisi kuitenkin parametri, joka tiivistäisi yhteen lukuarvoon koko taipumasuppilon sisältämän rakenteen ominaisuustiedon (Pavement Interactive 2009). Tarkoitukseen onkin kehitetty useita erilaisia parametreja. Myös SCI- ja BCI-arvot, joita tarkastellaan tierakenteen kuntoparametrien yhteydessä kappaleessa 6, kuvaavat tarkasti ottaen rakenteen taipumamuotoa pistemäisesti tietyssä kerroksessa.

Tarkastellaan käyttökelpoisiksi todettujen SCI- ja BCI-arvojen lisäksi parin hieman kattavammin koko rakenteen taipumamuotoa kuvaavan tunnusluvun yhteyttä rakenteen ominaisuuksiin ja vaurioihin. Tarkasteluun valittuja tunnuslukuja ovat AREA-parametri sekä Shape Factor F_1 . Parametrien arvot ovat suhteellisia lukuja, joten niiden pitäisi olla vertailukelpoisia eri taipumatasoillakin laskettuna. Sekä F_1 - että AREA-arvot ovat bitumilla sidotun päällystelaatan vaikutuksen johdosta lämpötilasensitiivisiä.

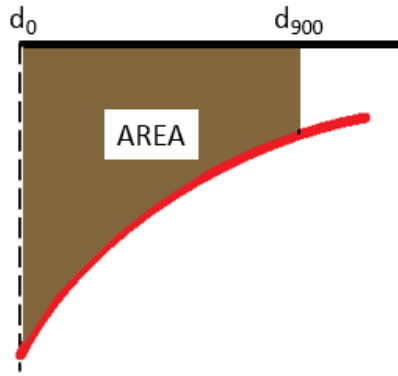
AREA-parametri kuvaa nimensä mukaisesti taipumasuppilon ja taipuman nollatasoa edustavan x-akselin rajoittamaa pinta-alaa välillä 0 – 900 mm (Kuva 20). Minkä tahansa tämän kaltaisen tason pinta-alan K estimaatin laskenta onnistuu puolisuunnikkasäännöllä, jonka yleinen muoto on esitetty kaavassa (12) (Pavement Interactive 2009):

$$K = h \times \left(\frac{1}{2} y_0 + y_1 + y_2 + \frac{1}{2} y_3 \right) \quad (12)$$

missä

$y_0 \dots y_3$ = alan lävistävät kohtisuorat jänneet

h = jänneiden välinen etäisyys



Kuva 20: AREA-parametrin määritelmä.

Laskennassa järkevästi käsitellään taipumamittauksen tuottamia 300 mm välein mitattuja taipumia kaavan (14) mukaisesti. AREA-arvo normalisoidaan jakamalla puolisuunnikas-säännöllä laskettu pinta-ala maksimitaipumalla (Pavement Interactive 2009). Tunnusluku on kehitetty Yhdysvalloissa perustuen sikäläisiin mittayksiköihin ja taipuma-antureiden jakaumaan, mutta siitä on myös SI-järjestelmän mukainen muunnos, joka lasketaan kaavalla (13) (Pavement Interactive 2010):

$$AREA = 150 \text{ mm} \times \left(\frac{d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900}}{d_0} \right) \quad (13)$$

AREA-parametrin yksikkö on normalisoinnin seurauksena millimetri, eikä pinta-alayksikkö mm^2 . Usein lukua käytetään kuitenkin paljaana ja yksikön tarkoitus on vain ilmoittaa, että käytössä on SI-mittayksiköihin perustuva arvo tuumamitan sijaan.

AREA-parametrin ajatellaan kuvaavan koko rakenteen kuormitusvastetta. Parametri saa teoreettisen maksimiarvonsa kaikkien kaavan (14) taipumien $d_0 - d_{900}$ ollessa yhtä suurina. Tämä vastaa kuvitteellista tilannetta, jossa rakenne on täysin taipumaton. Kaavasta nähdään, että AREA-parametrin suurin mahdollinen arvo on $150 \times 6 = 900$. Käytännössä edes lähelle maksimiarvoa on mahdollista päästä vain erittäin jäykillä betoniteillä (Pavement Interactive 2010). AREA-arvo on puolestaan sitä alhaisempi, mitä jäykempi pohjamaa on suhteessa rakenteen pintaosiin, eli mitä pienempi päällysrakenteen suhteellinen kuormia jakava vaikutus on.

F_1 on enemmän päällysrakenteen yläosan jäykkyyttä kuvaava suure (Pavement Interactive 2010). Se lasketaan kaavalla:

$$F_1 = \frac{d_0 - d_{600}}{d_{300}} \quad (14)$$

F_1 -arvo käyttäytyy päinvastoin kuin AREA-parametri: paksu ja jäykkä päällyste pienentää F_1 -parametrin arvoa, kun taas alhaisempi päällysteen jäykkyys ja kantavampi pohjamaa kasvattavat sitä. Olemassa on myös Shape Factor F_2 , joka lasketaan kaavalla (15). Kaavasta nähdään, että F_2 ei huomioi lainkaan päällysteen eikä kantavan kerroksen yläosan vaikutusta, vaan on lähinnä jakavan kerroksen ja alusrakenteen taipumamuotoa kuvaava suure.

$$F_2 = \frac{d_{300} - d_{900}}{d_{600}} \quad (15)$$

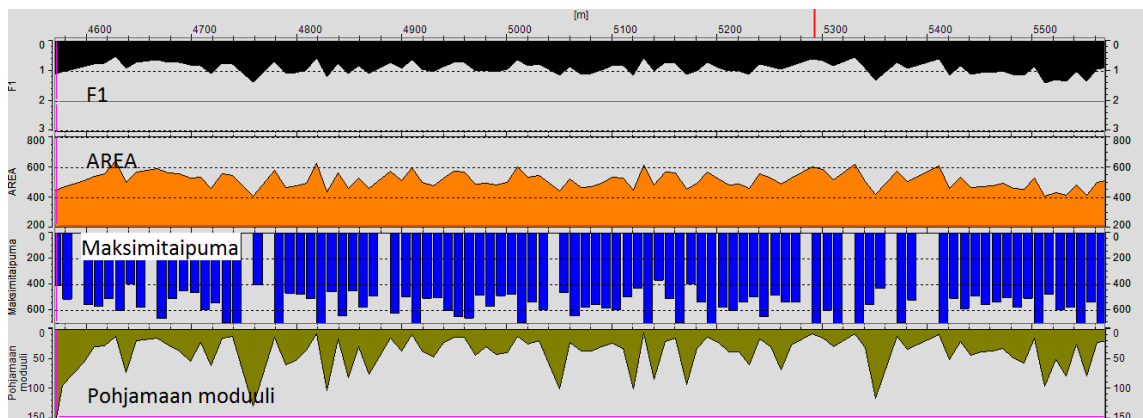
Taipuman muotoparametrien yhteys tierakenteen ominaisuuksiin

Taipuman muotoparametreja on tarkasteltu kolmella erityyppisellä tieosalla: Keski-Suomessa valtatie 13 tieosalla 126 sekä kantatie 58 tieosalla 26 ja Lapissa seututie 924 tieosalla 1. Tarkasteltavilta kohteilta mitatut taipumat on ensin lämpötilakorjattu kappaaleen 3.3 kuvaaman menettelyn mukaisesti ja sen jälkeen laskettu normalisoituja taipumia vastaavat F_1 - sekä AREA-arvot.

Tarkasteltaessa laskettuja muotoparametreja Road Doctorin näkymässä havaitaan, että sekä F_1 - että AREA-arvojen profiilit ovat muodoltaan lähes identtiset (Kuva 21). Kuvasta erottuu myös muotoparametrien arvojen riippuvuus pohjamaan jäykkyysominaisuuksista, joita kuvaamassa on käytetty kaavalla (11) laskettua ε_u -moduulia. Pohjamaan ominaisuuksien nähdään hyvin pitkälle määrävän myös lähinnä päällysrakenteen pintaosan taipumamuotoa kuvaavan F_1 -profiilin muodon.

Koska taipumamuototekijöiden profiileissa ei juuri ole eroavaisuuksia edes esimerkin kaltaisella paksupäällysteisellä tiellä, ei molempien parametrien tarkastelu erikseen tuo tutkimukselle lisäarvoa. Niinpä jatkossa rajaudutaan käsittelemään ainoastaan AREA-arvon yhteyttä rakenteen ominaisuuksiin.

Kokonaistaipuman perusteella tie 13 on rakenteeltaan vertailluista tieosista jäykin, vaikka silläkin keskimääräinen kokonaistaipuma on yli 520 μm . Myös tien 13 päällystepaksuus on suurin, keskimäärin noin 135 mm. Tiellä 924 päällystepaksuus on keskimäärin 105 mm ja kantatie 58 tutkitulla tieosalla ohuin, vain noin 50 mm. Tiellä 58 on myös runsaasti vahvisteverkkoja ottamassa vetojännityksiä, joita liikennekuormat ja mahdollinen routanousu mobilisoivat tien joustavaan rakenteeseen.



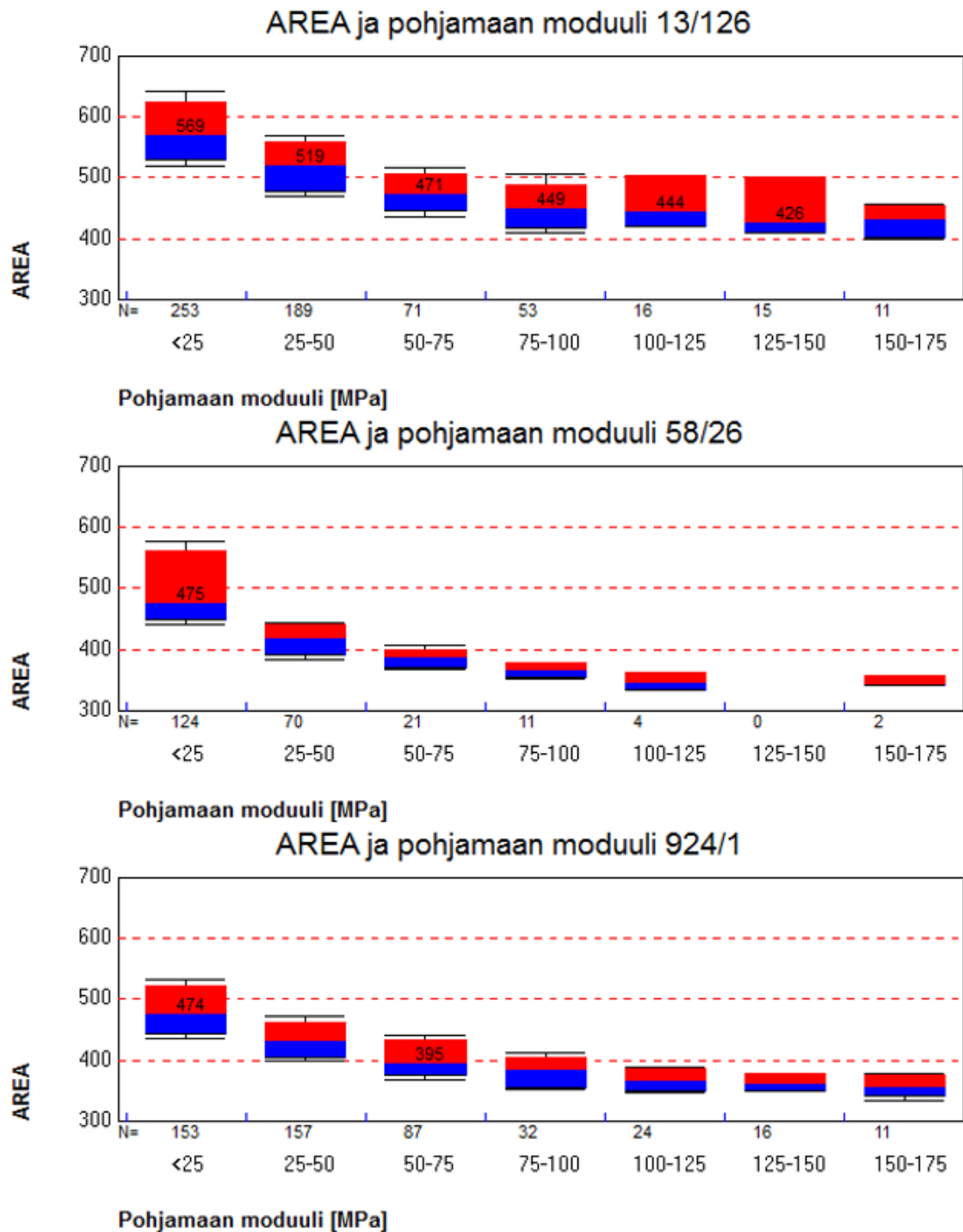
Kuva 21: F_1 - sekä AREA-parametrien vertailu maksimitaipuman suuruuteen ja pohjamaan moduuliarvoon valtatie 13 tieosalla 126.

Jäykän rakenteen vaikutus näkyy tien 13 parhaana AREA-arvona, vaikka pohjamaan moduuli monin paikoin onkin alhainen. Keskimääräinen AREA-arvo tiellä on 520, kun se vertailluista kohteista alhaisin oli tiellä 924, vain 426. Ulkomaisten lähteiden mukaan paksuilla (> 100 mm) joustavilla päällysteillä AREA-arvon tyypillinen vaihteluväli on 530 – 760 mm ja ohuilla päällysteillä 410 – 530 mm (Pavement Interactive 2009), joten

suomalaisten tierakenteiden ohuet ja joustavat päällysrakenteet heijastuvat myös taipumamuototekijöiden arvoon.

Edellä tien 13 esimerkistä (Kuva 21) nähtiin selkeä yhteys pohjamaan ja alusrakenteen jäykkyyttä kuvaavan ϵ_u -moduulin ja taipumamuotoparametrien välillä. Vielä selkeämmin taipumamuodon ja pohjamaan moduuliarvon yhteys käy ilmi tilastollisessa vertailussa (Kuva 22). Kuvaajista erottuu vahva logaritminen riippuvuus. Esimerkiksi tien 58 tutkitulla tieosalla pohjamaan moduuliarvon vaihtelu selittää taipumamuodon muutokset yli 95-prosenttisesti.

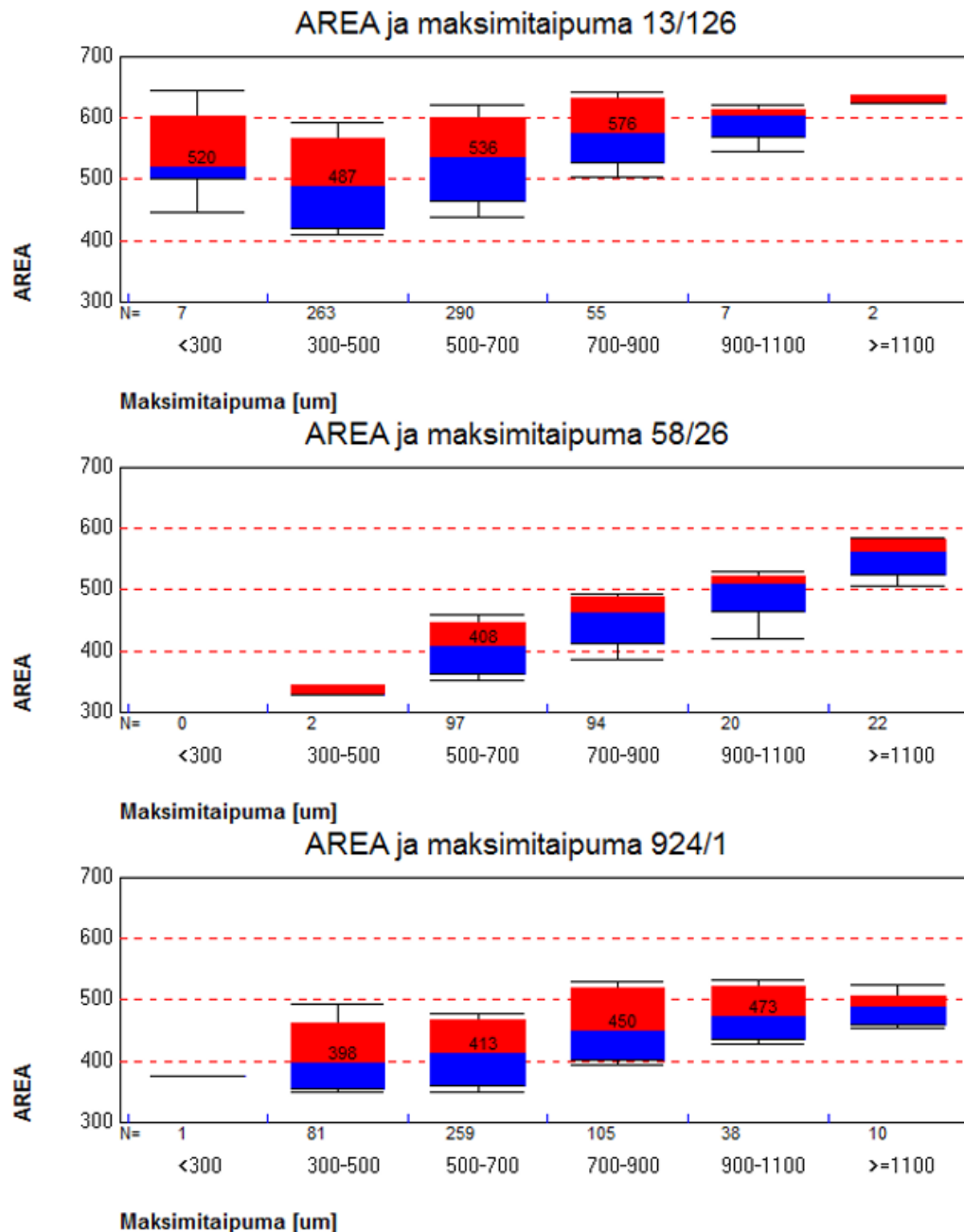
Teoriassa kantavamman pohjamaan todettiin alentavan AREA-arvoa. Esimerkistä nähdään, että tilanne on tämä myös käytännössä. Huomionarvoista on kuitenkin, miten eri tasolla samaa pohjamaan moduuliarvoa vastaavat AREA-arvot ovat rakenteellisesti erityyppisillä teillä: Jäykkärakenteisen tien 13 AREA-arvot ovat huomattavasti korkeampia kuin teiden 58 ja 924, joiden rakennekerrokset ovat ohuempia ja rakenteellinen jäykkyys alhaisempi.



Kuva 22: Taipumamuodon yhteys pohjamaan ja alusrakenteen jäykkyysmoduulin arvoon.

Taipumamuodon ja pohjamaan moduulin keskinäinen riippuvuus antaa olettaa, että myös rakenteen kokonaistaipuma vaikuttaa taipumamuodon määräytymiseen. Tätä olettamusta tukee aiempi havainto (Kuva 18), että pohjamaan taipumaominaisuuksien vaikutus kokonaistaipuman suuruuteen on melko voimakas etenkin ohutpäällysteisillä teillä.

Korrelaatiokuvaajista (Kuva 23) nähdään, että kokonaistaipuman kasvu johtaa odotusten mukaisesti suurempaan AREA-arvoon. AREA-parametrin yhteys sekä pohjamaan moduuliin, että kokonaistaipuman suuruuteen on teorian mukainen: heikolla pohjamaalla päällysrakenteen suhteellinen jäykkyys kasvaa, mikä näkyy kasvavana AREA-arvona.

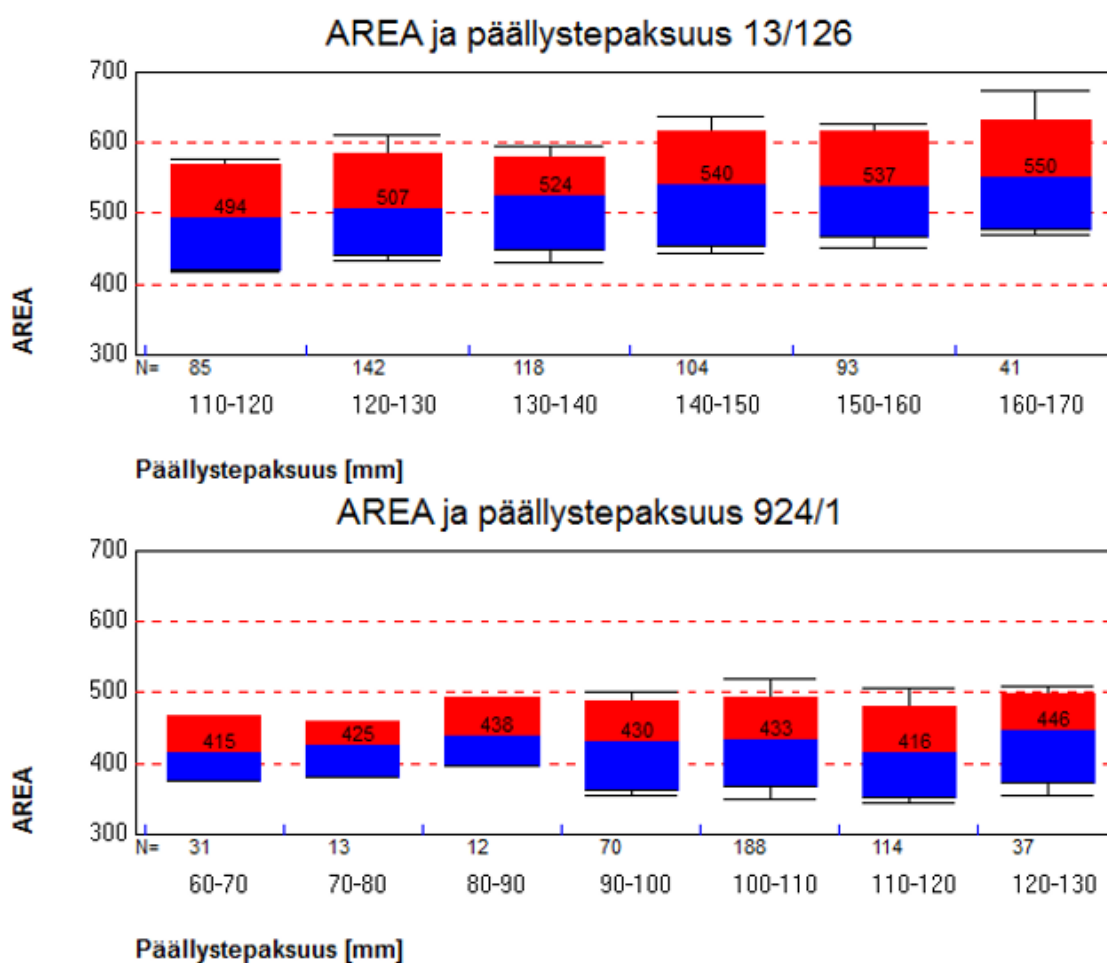


Kuva 23: Taipumamuodon yhteys rakenteen kokonaistaipuman suuruuteen.

Tiellä 13 maksimitaipuman yhteys taipumamuotoon ei ole yhtä suoraviivainen kuin kahdella muulla vertailuun valitulla tiellä. Selittävä tekijä on todennäköisesti tien paksumpi rakenne, jolloin rakennekerrosten vaikutus kokonaistaipumaan on suhteessa suurempi ja taipumasuppiloiden muodossa enemmän vaihtelua kuin esimerkin kahdella taipuisammalla tiellä, joilla koko rakenteen pinnasta mitattavaan jäykkyyteen vaikuttaa etupäässä

pohjamaan laadun vaihtelu. Kaikkein lineaarisin maksimitaipuman ja AREA-arvon yhteys on nimenomaan tiellä 58, jolla päällystepaksuus on kaikkein ohuin ja taipumat suurimpia.

Päällysrakenteen vaikutusta taipumamuotoon on yritetty selvittää AREA-arvoa ja päällystepaksuutta vertaamalla (Kuva 24). Mielenkiintoinen olisi myös samoista taipumista laskettujen SCI-arvon ja AREA-parametrin vertailu, mutta esimerkiksi valtatie 13 tarkastellulla tieosalla SCI-arvot ovat kauttaaltaan hyviä ja arvojen vaihteluväli niin pieni, ettei se käytännössä tuo esiin juurikaan rakenteellista vaihtelua. Päällystepaksuudenkin hajonta on tarkastelluilla tieosilla vähäistä. Erityisesti tien 58 tutkitulla tieosalla päällyste on kauttaaltaan niin ohut ja päällystepaksuuden vaihtelu niin olematonta, että tieosan tulokset on jätetty vertailusta kokonaan pois.



Kuva 24: Taipumamuodon riippuvuus päällystepaksuudesta. Päällystepaksuuden vaihteluväli vaaka-akselilla on tutkituilla teillä erilainen.

Tiellä 13 jäykähkön AB-laatan paksuuden kasvulla on pääsääntöisesti AREA-arvon mediaania korottava vaikutus, joskin hajonta luokkien sisällä on melko voimakasta. Tien 924 tuloksista vastaavaa trendiä ei ole havaittavissa. Tosin tällä tiellä päällystepaksuus painottuu voimakkaasti 90 – 120 mm välille, joten muut vertailun luokat eivät ole alkioiden määrän suhteen edustavia. Tosin on täysin odotettua, että ohuemman ja taipuisan

PAB-laatan vaikutus taipumamuotoon ei voikaan olla yhtä selkeä kuin tien 13 rakennetta huomattavasti enemmän jäykistävällä paksummalla AB-päällysteellä.

Sidotun kerroksen jäykkyyden vaikutus taipumamuotoon näkyy vertaamalla AREA-arvon mediaaneja kummallekin tielle yhteisissä päällystepaksuusluokissa välillä 110 – 130 mm. Ero jäykemmän AB-päällysteen hyväksi on selkeä. Toki sitomattomienkin rakennekerrosten ominaisuuksilla on jonkin verran vaikutusta taipumamuodon määräytymiseen, mutta kerrosten alhaisemmasta jäykkyydsmoduulista ja tierakenteiden pituussuuntaisesta heterogeenisyydestä johtuen vaikutusta on vaikea tuoda esiin. Ainakaan yhteenlaskettu rakennepaksaus ei korreloi taipumamuodon kanssa tai muu rakenteen ja pohjasuhteiden vaihtelu peittää vaikutuksen.

Joka tapauksessa pudotuspainolaitteen taipumista laskettavaksi kehitetyt muotoparametrit toimivat oletetulla tavalla myös jatkuvan taipumamittauksen tuloksista laskettuina: rakenteen pintaosan jäykkyyden kasvu suhteessa alusrakenteeseen ja pohjamaahan kasvatti AREA- ja pienensi F_1 -arvoa. Lisäksi AREA-arvojen suuruusluokka heijastelee maamme tierakenteille tyypillistä dynaamista luonnetta, joka on seurausta kansainvälisellä mittapuulla verraten ohuista rakennekerroksista ja pehmeiden päällystelaatujen käyttämisestä.

Taipumamuotoparametrien yhteys tierakenteen vaurioihin

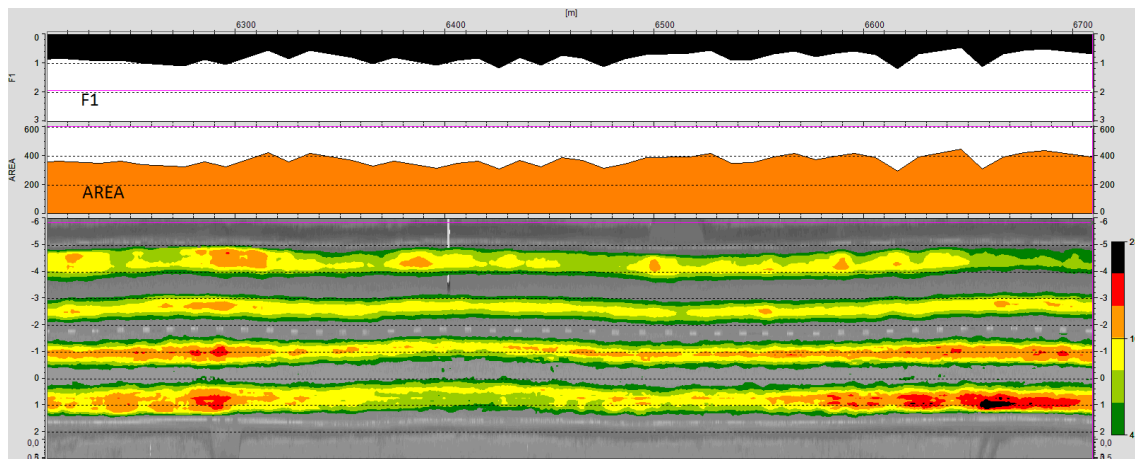
Tarkasteluun valittujen taipumamuotoparametrien yhteyttä rakenteen eri ominaisuuksiin on edellä käsitelty melko laajasti ja todettu parametrien arvon seurailevan rakenteen ominaisuuksia odotetun kaltaisesti. Rakenteiden diagnostiikan kannalta ratkaisevaa on kuitenkin, kytkeytyykö parametrien kuvaama rakenteen taipumamuoto tiessä havaittaviin vaurioihin, vai esiintyykö vaurioita tielinjalla sattumanvaraisesti muototekijöiden arvosta riippumatta.

Alun perin edellä käsitellyt taipumamuotoparametrit on laskettu PPL-taipumista, jolloin pitkät mittauspisteiden välit niihin liittyvine edustavuusongelmineen saattavat hämärtää parametrien yhteyttä jatkuvana määritettäviin tien ominaisuuksiin, kuten laserskannerin datasta laskettuun urasyvyyteen. Mielenkiintoista onkin, parantaako jatkuvana saatava taipumatieto korrelaatiota ja paljastuuko taipumamuotoparametrien ja tierakenteen kuorimitukseen liittyvien vaurioiden väliltä uusia yhteyksiä

Tienpinnan IRI-arvona kuvattava pituussuuntainen epätasaisuus ei tyypillisesti näy taipumissa. Urasyvyys puolestaan on helposti numeerisesti ilmaistava vauriomuoto, jonka taustalla usein vaikuttavat erilaiset deformaatiomekanismit ovat tunnistettavissa taipumatuloksista kohonneiden SCI- ja BCI-arvojen perusteella.

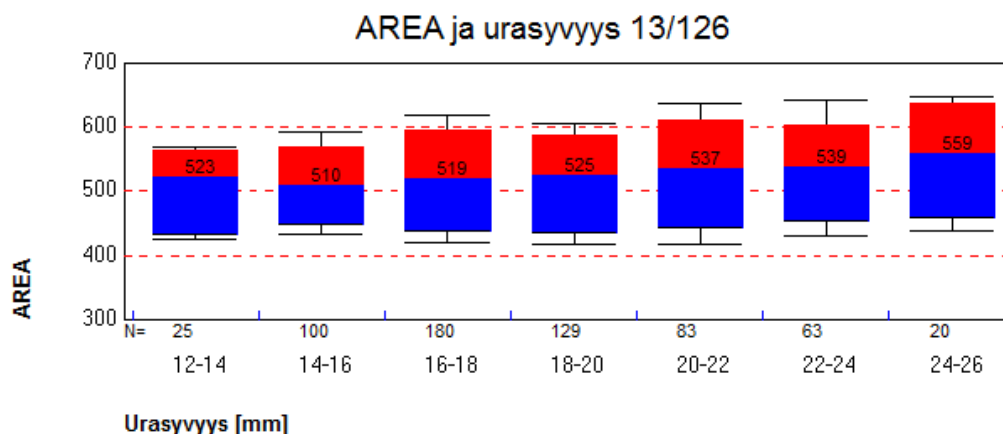
Tien 13 esimerkistä (Kuva 25) nähdään, että vaikka taipuman muotoparametrit korreloivat hyvin rakenteen ja pohjamaan jäykkyysominaisuuksien kanssa, ei niillä ole silminnähtävää yhteyttä RDSV-mittauksella määritetyn tien urasyvyyden kanssa. Näin siitäkin huolimatta, että kuvan leveä uramuoto indikoi urautumisen olevan pääosin seurausta nimenomaan pysyvien muodonmuutosten vaikutuksesta, eikä niinkään tienpinnan mekaanisesta nastarengaskulutuksesta, jonka vaikutus näkyisi kapeahkoina urina henkilöauto-

jen raideväliä vastaavalla etäisyydellä toisistaan. Lisäksi esimerkiksi paalun 6300 kohdalla kuvan vasemmassa reunassa nähdään selkeä pistemäinen voimakkaan urautumisen kohta, jonka perimmäinen aiheuttaja on laserskannerin kuvan alareunassa erottuvan yksityistieliittymän puuttuva tai tukkeutunut liittymärumpu.



Kuva 25: AREA- ja F1-profililit sekä urasyvyys valtatie 13 tieosalla 126. Taipumamuotoparametrien arvot on laskettu voimakkaammin urautuneessa suunnassa.

Tien 13 samalla tieosalla tehty taipumamuodon ja urasyvyyden tilastollinen tarkastelu ei myöskään tuo esiin kovinkaan selkeää yhteyttä urasyvyyden vaihtelun ja AREA-arvon kuvaaman taipumamuodon välillä (Kuva 26). Luokkien mediaaneissa on havaittavissa aavistuksen nouseva trendi ehkä rakenteen tiivistymistä seuranneesta lujittumisesta johtuen, mutta AREA-arvon hajonta on silti voimakasta eikä selkeää selittävää yhteyttä ole nähtävissä. Yhteyden löytämistä hankaloittaa toki, että urautumisen taustalla vaikuttavat moninaiset mekanismit aina rakenteen tiivistymisestä sen eri osien deformaatioitumiseen. Näiden vaikutus rakenteen taipumiin saattaa olla täysin päinvastainen: tiivistyminen lujittaa rakennetta ja pienentää taipumia kun taas deformaatioriski näkyy suurina eri kerrosten taipumien erotuksina.

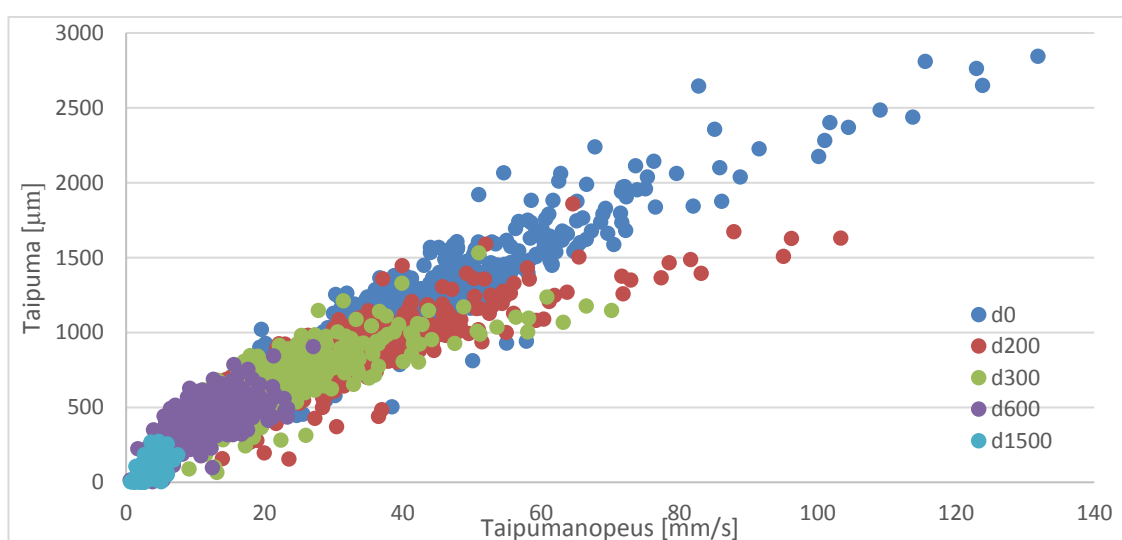


Kuva 26: Taipumamuodon yhteys oikeasta ajourasta mitattuun urasyvyyteen.

Taipumamuoto on etenkin taipumasuppilona mutta myös yhdeksi lukuarvoksi tiivistetynä taipumamuotoparametrina erittäin informatiivinen ja käyttökelpoinen työkalu rakenteen ja sen yksittäisten kerrosten jäykkyysominaisuuksia arvioitaessa. Kuitenkaan tierakenteiden vauriotarkasteluun tutkitut AREA- ja F_1 -parametrit eivät näytä tuovan lisäarvoa.

5.1.2 Taipumanopeus ja -aika

Kappaleessa 5.1.1 todettiin rakenteen suuren kokonaistaipuman olevan pitkälti seurausta huonosti kantavasta pohjamaasta tai alusrakenteesta. Taipuman suuruus puolestaan kytkeytyy kiinteästi taipumanopeuteen (Kuva 27), mikä on kantava ajatus koko TSD:n taipumalaskentamallin takana.



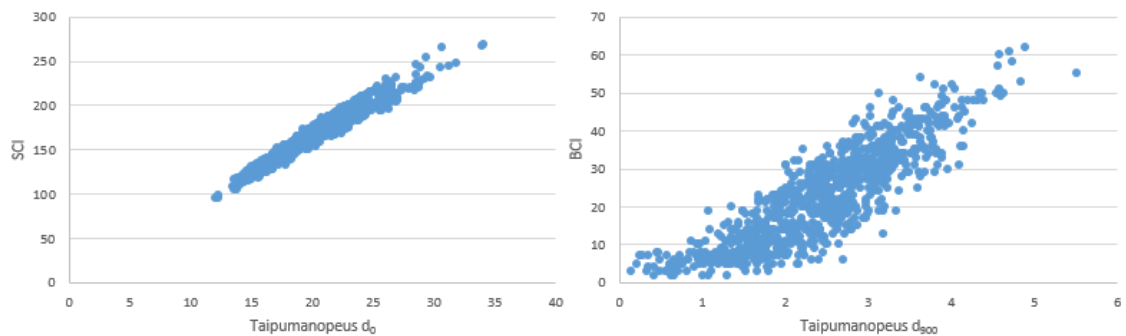
Kuva 27: Taipumanopeuden ja eri etäisyyksillä mitattujen taipumien yhteys yhdystiellä 19538

TSD-mittausajoneuvon nopeuden vaikutus taipumien määrittämiseen pyritään eliminoidaan Deflection Slope -arvon laskennassa. Korrelaatio Deflection Slope -arvon ja taipuman välillä on lähes kauttaaltaan aavistuksen parempi kuin suora laseranturin määrittämisen taipumanopeuden ja taipuman välillä (Taulukko 6). Taulukon vertailuun valittujen tieosien tuloksista nähdään punaisella värillä korostettujen Keski-Suomen kohteiden korkean mittauslämpötilan korrelaatiota heikentävä vaikutus, jota kantatien 77 suurempi päällystepaksuus edelleen näyttäisi korostavan.

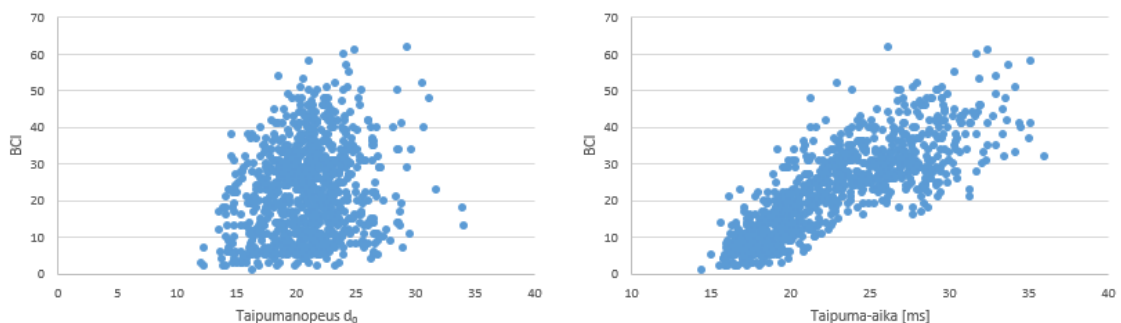
Taulukko 6: Eri antureiden rekisteröimän taipuman sekä vastaavan taipumanopeuden ja Deflection Slope -arvon korrelaatio erityyppisillä teillä.

	Tie/tos	Taipuma					
		d0	d200	d300	d600	d1500	
Taipuma- nopeus	58/26	0,66	0,73	0,76	0,76	0,78	KES
	77/1	0,48	0,55	0,61	0,62	0,72	
	924/1	0,80	0,77	0,77	0,77	0,81	LAP
	19538/1	0,91	0,83	0,77	0,59	0,54	
Deflection Slope	58/26	0,73	0,79	0,81	0,76	0,79	KES
	77/1	0,51	0,60	0,65	0,63	0,73	
	924/1	0,84	0,81	0,80	0,12	0,82	LAP
	19538/1	0,92	0,83	0,77	0,59	0,56	

Teorian mukainen lineaarinen riippuvuus nousee lähes täydelliseksi, mikäli maksimitaipuman taipumanopeutta verrataan SCI-arvoon, eli kun maksimitaipumasta poistetaan 200 mm syvempien kerrosten vaikutus (Kuva 28). Korrelaatio on melko hyvä myös d_{900} -taipuman nopeuden ja BCI-arvon vertailussa, kantatien 78 esimerkin tieosalla korrelaatiokerroin saa arvon 0,75. Sen sijaan koko rakenteen taipumanopeuden yhteydessä BCI-arvoon (Kuva 29) tai pohjamaan moduuliin ei ole kovinkaan selkeää riippuvuussuhdetta, eli kuormituspisteen alta mitattava taipumanopeus saattaa olla sama hyvinkin erilaisen taipumamuodon saavilla rakenteilla. Näin ollen taipumanopeus ei näyttäisi tuovan uusia näkökulmia tierakenteen vauriotarkasteluun.



Kuva 28: SCI- (vas.) ja BCI-arvojen (oik.) yhteys vastaaviin taipumanopeuksiin. Esimerkki kantatien 78 tieosalta 219.



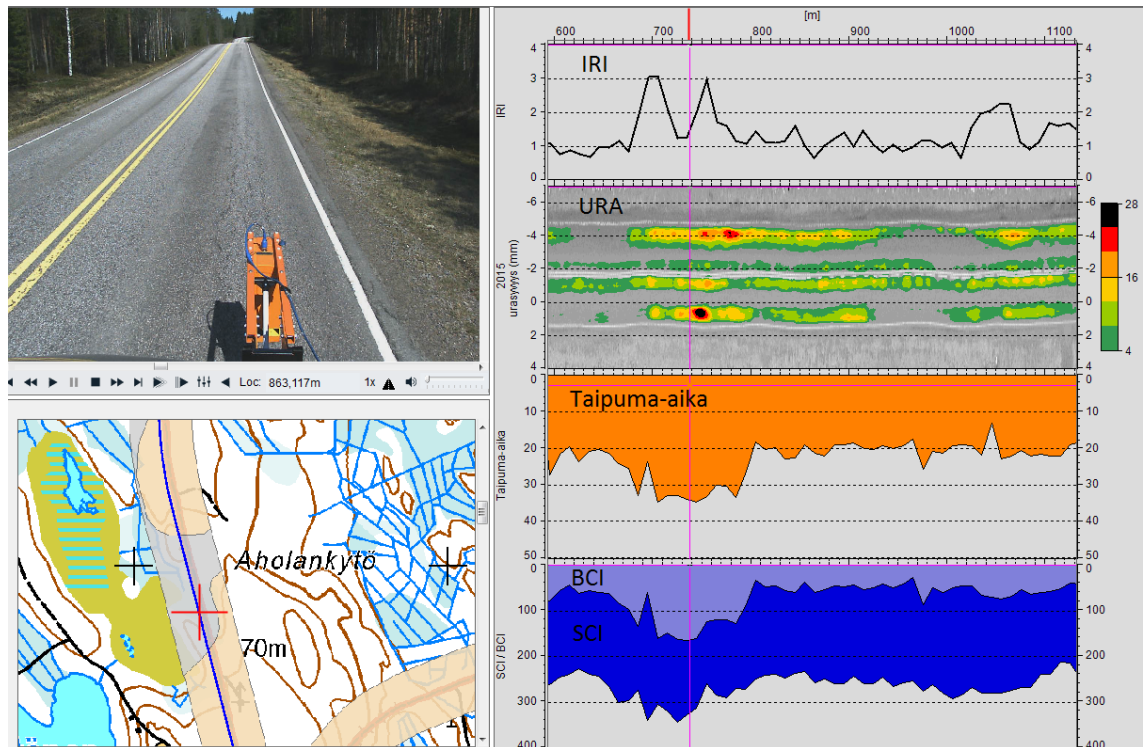
Kuva 29: Taipumanopeuden (vas.) ja taipuma-ajan (oik.) yhteys laskettuun BCI-arvoon. Esimerkki kantatien 78 tieosalta 219.

Tarkastellaan seuraavaksi taipuman suuruudesta riippuvan taipumanopeuden sijaan taipuman mobilisoitumiseen kuluva laskennallista aikaa. Taipuma-ajan laskenta huomioi kaavan (16) mukaisesti sekä mitatun taipuman suuruuden, että tätä vastaavan taipumanopeuden. Tässä rajaudutaan tarkastelemaan nimenomaan maksimitaipuman taipuma-aikaa ja tätä vastaavaa taipumanopeutta.

$$\text{Taipuma} - \text{aika} = \frac{\text{Taipuma}}{\text{Taipumanopeus}} \quad (16)$$

Kantatien 78 esimerkistä (Kuva 29) havaitaan, että maksimitaipuman taipuma-aika korreloi pohjamaan deformatumisriskiä kuvaavan BCI-arvon kanssa huomattavasti paremmin kuin vastaava taipumanopeus. Yhteys kasvavan BCI-arvon ja pidemmän taipuma-ajan välillä on selkeä; esimerkin tieosalla näiden korrelaatiokerroin on lähes 0,82. Myös alhaisempi pohjamaan moduuliarvo johtaa tarkastelujen perusteella pidempään taipuma-aikaan, mikä on linjassa edellisen havainnon kanssa.

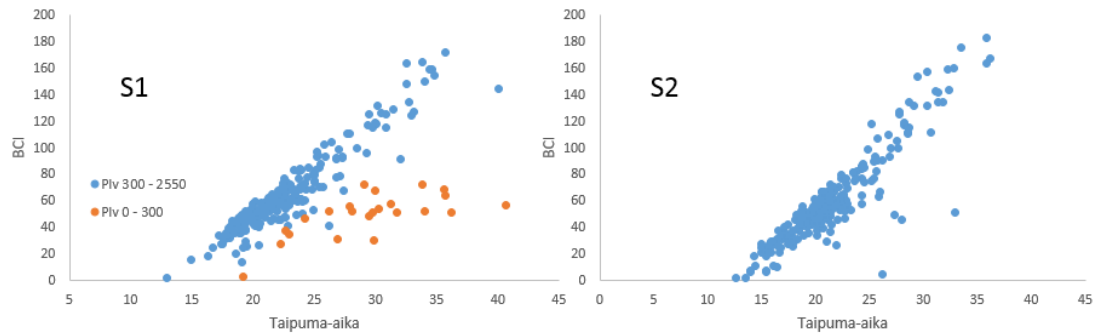
Kohonnut taipuma-aika näyttäisi näin ollen liittyvän säännönmukaisesti pehmeisiin tai jäykkyydeltään voimakkaasti muusta rakenteesta poikkeaviin pohjamaihin. Nämä ovat kohtia, joissa myös riski rakenteen vaurioitumiselle on suuri. Toisaalta parametrin profiili on monin paikoin muodoltaan lähes yhteneväinen vakiintuneen BCI:n profiilin kanssa (Kuva 30), eikä siinä mielessä tuo mitään uutta tierakenteen vauriodiagnostiikkaan. Esimerkkikuvassa taipuma-ajan ja BCI:n profiilien pistemäinen anomalia paalun 1000 jälkeen liittyy maatutkakuvan ja ojavideoiden perusteella tierakenteen alittavaan rumpuun.



Kuva 30: Taipuma-aika ja vakiintuneet SCI ja BCI tierakenteen vaurioiden indikaattorina kantatien 58 tieosalla 26.

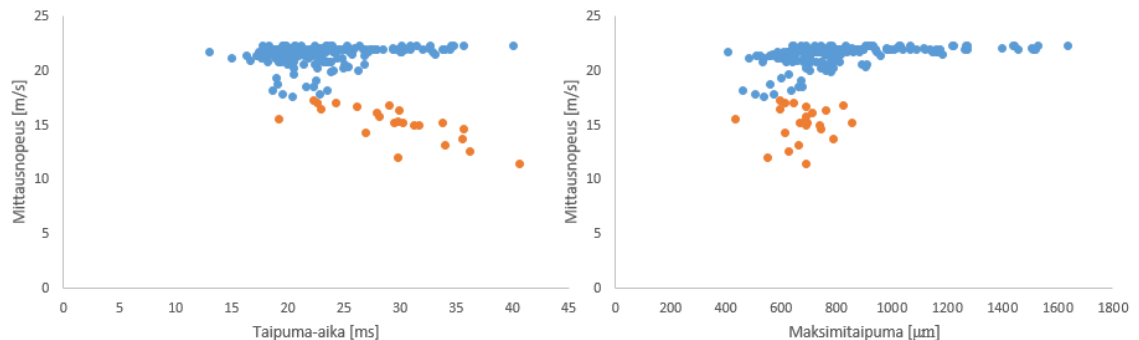
Taipuma-aikaan liittyvä kiinnostava huomio on kuitenkin, että vaikka taipumanopeus- ja BCI-profiilit noudattelevat muodoltaan melko pitkälti toisiaan, voi arvojen tasoero vaihdella erilaisten teiden mittauksissa huomattavastikin. Esimerkiksi tiellä 13 BCI-arvoa 20 vastaava taipuma-aika on likimain sama, joka tiellä 78 vastaa BCI-arvoa 60. Eroja voivat aiheuttaa poikkeavat rakennepaksuudet tai lämpötilan suhteen normalisoimattomana laskettavan BCI:n tapauksessa mittaushetkiset olosuhde-erot. Todennäköinen eroja selittävä tekijä on myös TSD-mittauksessa käytetty ajonopeus.

Mittauksessa käytetty nopeus heijastuu selkeästi taipuma-aikaan ja sen BCI-korrelaatioon (Kuva 31). Suunnan 1 mittaus on aloitettu paikaltaan tieosan alusta. Tyypillisesti TSD-mittaukset tehdään jatkuvana pidemmille jaksoille ja tuloksista erotellaan jälkikäteen halutut jaksot, esimerkiksi tieosat, omiksi tiedostoikseen, jolloin nopeustekijän vaikutus näyttäytyy näin voimakkaana vain harvoilla tieosilla.



Kuva 31: BCI-arvon vaikutus rakenteen taipuma-aikaan. Esimerkki on tien 58 tieosalta 26. Tieosoitteen kasvusuunta on esitetty vasemmalla ja laskusuunta oikealla. Alle 60 km/h mittausnopeudella tieosan alussa rekisteröidyt taipuma-ajat on esitetty oranssilla värillä.

Ensimmäisen 80 metrin matkalta mitatut taipumat eivät tulostu esimerkin tapauksessa tulostiedostoon lainkaan, koska kiihdyttävän mittausajoneuvon nopeus on tuolloin alle 38 km/h (noin 10,6 m/s). Likimain 300 metrin matkalla mittausajoneuvo on saavuttanut 60 km/h (noin 16,7 m/s) nopeuden. Tätä alhaisemmalla nopeudella mitattu aineisto heikentää selvimmin taipumanopeuden BCI-korrelaatiota ja kasvattaa taipuma-aikaa verrattuna tien loppuosan ja suunnan 2 mittauksiin (Kuva 31, Kuva 32). Paaluväliltä 0 – 300 mitatut arvot on esitetty kuvaajissa oranssilla värillä.



Kuva 32: TSD-mittausnopeuden vaikutus laskennalliseen taipuma-aikaan (vas.) sekä mitattuun maksimitaipumaan (oik.). Esimerkki kantatien 58 tieosan 26 suunnan 1 mittauksesta. Alle 60 km/h mittausnopeudella rekisteröidyt tulokset on esitetty oranssilla värillä.

Muuttuvalla nopeudella mitattuja pisteitä on korostettu oranssilla värillä. Nähdään, että muuttuva mittausnopeus vaikuttaa laskennalliseen taipuma-aikaan suhteellisen lineaarisesti. Sitä vastoin samojen pisteiden maksimitaipuman suuruuteen mittausnopeuden muutoksella ei ainakaan tällä vaihteluvälillä näyttäisi olevan vaikutusta. Kaikkein alhaisimmissa nopeuksissa tilanne on toinen, minkä vuoksi 38 km/h alittavalla nopeudella mitatut taipumat suodattuvat tuloksista pois. Taipuma-ajan nopeusriippuvuuden vuoksi parametri ei ole esimerkiksi BCI:n tavoin käyttökelpoinen tierakenteen diagnostiikassa.

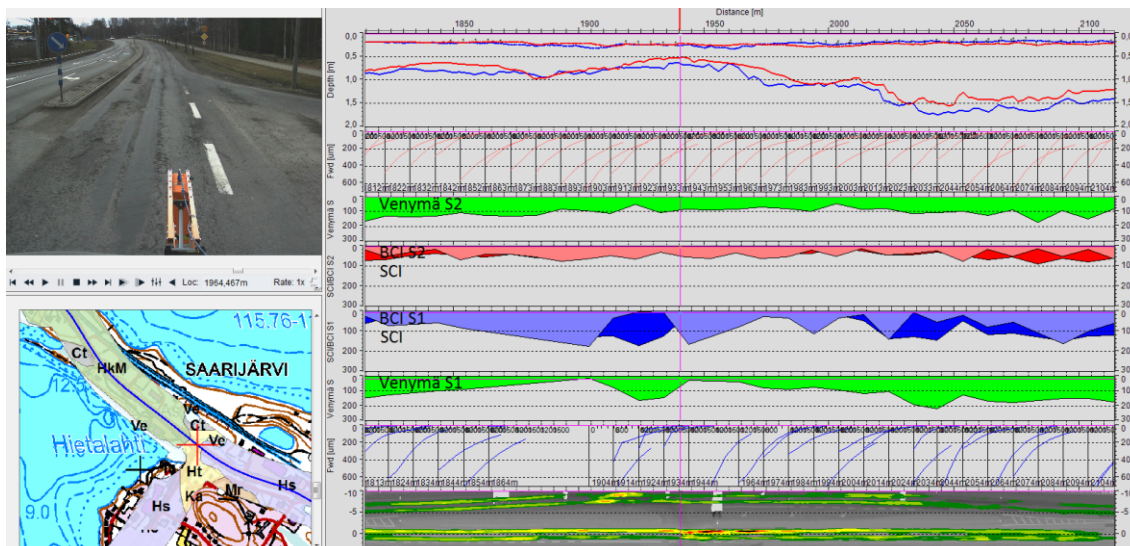
5.1.3 TSD-taipumatulosten epäjohdonmukaisuudet

PEHKO-projektin yhteydessä mitatut TSD-tulokset ovat valtaosaltaan hyviä, mutta tiettyjen kohteiden osalta mittauksiin liittyy suoranaisen virheellisiä arvoja. Tulosten epäjohdonmukaisuudet näkyvät mitattujen taipumien erittäin voimakkaana hajontana, selkeän virheellisinä, paikoitellen jopa negatiivisina taipuma-arvoina, näistä seuraavana runsaana puuttuvien datapisteiden joukkona ja vaurioihin nähden huomattavan hyvinä kuntaindeksien arvoina.

Kaikkein ongelmallisimpia kohteita PEHKO-aineistossa ovat valtatie 13 tieosa 134 Keski-Suomessa sekä yhdystien 9241 tieosa 1 Lapissa. Koska kyseessä ovat rakenteellisesti näin erityyppiset tiet, ei mikään tietty rakenteellinen tekijä kelpaa selittämään mittauksen epäonnistumista. Myöskään mittaushetkisistä olosuhteista ei löydy yhteistä selittävää tekijää, sillä Keski-Suomen mittauksia on tehty hellesäässä ja Lapin kohteen keskimääräinen pintalämpötila on mitattaessa ollut + 16,2 °C.

Road Doctorin näkymään (Kuva 33) kootusta taipuma-aineistosta nähdään taipuma-arvojen suuri hajonta ja poikkeuksellinen taipumamuoto osalla valtatie 13 tieosan 134 mitauspisteistä. Taipumista lasketut päällysteen alapinnan venymä sekä SCI saavat huomattavan alhaisia arvoja, kirkkaalla värillä esitetty SCI on paikoitellen jopa BCI-arvoa alhaisempi. Laserkeilaamalla määritetty urautuminen ja paikoittaiset pituussuuntaiset väsymishalkeamat kuitenkin edellyttäisivät paljon suurempia taipumia. Taipuma-arvoja jää myös kokonaan tulostumatta huomattavan paljon.

Valtatien 13 tarkasteltava 4000 m pituinen tieosa 134 on mitattu kumpaankin suuntaan. Suunnan 1 mittauksessa taipumat ovat jääneet tulostumatta 16 % mitauspisteistä, suunnassa 2 tyhjiä on 18 % mitatuista riveistä. Osa tyhjiä riveistä selittyy alhaisella ajonopeudella, joka liittyy esimerkiksi liikenneympyrään paalun 2400 läheisyydessä. Ajonopeudesta johtuvat puutokset ovat tyypillisesti laaja-alaisia, useiden kymmenien metrien matkaa koskevia tyhjiä joukkoja, eivät yksittäisiä rivejä. Yksittäiset tyhjät rivit näyttävät selittyvän pääasiassa sillä, että näiden kohdalla laitevalmistajan ohjelma on tunnistanut anturien syötteen korruptoituneeksi ja hylännyt pisteen. Perusteita automaattiseen hylkäykseen käsitellään laatuparametrien yhteydessä kappaleessa 5.3.



Kuva 33: TSD-taipumasuppilot ja niistä laskettuja tunnuslukuja suunnittain valtatie 13 tieosalla 134. Ylhäällä tulkitut päällystepaksuus sekä rakenteen kokonaispaksuus. Sininen kuvaa tieosoitteen kasvusuuntaa ja punainen laskusuuntaa. Alimpana on liisäksi urakartta.

Tien 9241 tieosan 1 mittauksella on pituutta noin 5600 metriä, matkalla on 10 metrin väleille keskiarvoistettuja TSD-datapisteitä 559 kappaletta. Näistä tyhjiä on 5 %, eli 29 pistettä. Laitevalmistajan seulan läpäisseitä, mutta silti selkeän virheellisiä, negatiivisista taipumanopeuksista laskettuja taipuma-arvoja on puolestaan tulostunut 206 riville, mikä on 37 % kokonaisrivimäärästä. Yhteensä siis tyhjiä tai selkeästi virheellisiä rivejä on 42 % koko tieosalla mitatusta joukosta. Jäljelle jäävästä pistejoukosta ei erotu karkeita virheitä, mutta runsaan virhemäärän huomioon ottaen on epäselvää, onko niiden suuruusluokka sattumanvaraisesti oikea, vai vastaavatko mitatut taipumat todellisia rakenteen ominaisuuksia. Virheelliset rivit ovat hajallaan koko tieosan mitalla, tyhjät rivit puolestaan painottuvat linjan alkupäähän, ensimmäisen kolmen kilometrin matkalle tieosan alusta lukien.

Osassa pisteitä kaikki laseranturit ovat rekisteröineet negatiivisia taipumanopeuden arvoja. Tällöin taipumalaskenta jättää koko rivin tyhjäksi. Ongelmia ilmenee, kun negatiivisia arvoja antaa vain yksi tai muutama anturi. Tästä seuraa, että vastaavassa kohdassa taipumasuppilon kaltevuuskulmaa kuvaava Deflection Slope -parametri saa negatiivisen arvon, mikä mitä ilmeisimmin heijastuu kaikkien taipumien laskentaan pisteessä, ja taipumalaskennan tuloksiin tulee karkea virhe. Ongelma ei liity mihinkään tiettyyn anturiin, vaan virhelähde vaihtelee. Myöskään tienpinnan epätasaisuus ei näyttäisi aiheuttavan ongelmaa, koska esimerkiksi tiellä 924 laserantureita kannattelevan palkin liikkeen vaihteluväli on huomattavasti tien 9241 vastaavaa suurempi, ja kohde on silti TSD-mittauksen tulosten valossa täysin toimiva.

Sen sijaan yhteinen nimittäjä saattaa löytyä ongelmallisten tieosien pinnan tekstuurista. Kummallakin tieosalla päällysteen pinta on videoiden ja kuvien perusteella melko avoin ja pinnalle ominaista ovat ja päällysteen ja sen paikkausten purkaumat sekä etenkin poh-

joisessa auranraapimat. Päälysteen pinnan ollessa erittäin karkea, purkautunut ja mahdollisesti osittain irtonaisen kiviaineksen peittämä, alkaa pinta tekstuurinsa puolesta muistuttaa soratietä, jonka taipumamittauksiin TSD:n optinen menetelmä ei sovellu. Soratien mittauksessa lasersäteen heijaste tulee täysin sattumanvaraisesti rakeiden pinnalta tai väleistä, mikä aiheuttaa tuloksiin niin suurta suhteellista vääristymää, ettei edes normaalioloissa valtaosan tulosten kohinasta korjaava 10 m keskiarvomenettely kykene prosessoimaan aineistoa kelvolliseksi taipumatiedoksi.

5.2 Muu TSD:n rekisteröimä tieto

Vaikka TSD:n taipumien laskennan pääperiaate lasersäteiden taajuuden muutoksen ja ajoneuvon nopeuden perusteella on varsin yksinkertainen, on taustalla oleva laskenta silti verraten monimutkainen ja oikeiden tulosten saamiseksi on huomioitava monia laskennan korjausprosesseihin liittyviä muuttujia. Mittauksen aikana vaaditaan jatkuvaa olosuhteiden monitorointia niin kalibrointiin vaikuttavan laitteiston lämpötilan kuin mittalaitteiden liikkeidenkin osalta.

Näin ollen myös TSD-mittauksen tulostiedostossa esitetään paljon lähinnä laitteiston kalibroinnin kannalta oleellista tietoa olosuhteista perävaunun sisällä laitetilassa. Perävaunun kuormakorin sisälämpötilaa tarkkaillaan kolmessa pisteessä ja lisäksi antureita kannattavan palkin lämpötilaa kuudessa kohdassa. Mittalaitteen kalibrointi tapahtuu tietyssä lämpötilassa, josta mittaushetkiset olosuhteet eivät saa lämpölaajentumisen aiheuttaman virheen vuoksi liiaksi poiketa tulosten vääristymättä. Erikseen monitoroidaan myös mittaantureita kannattelevan palkin liikkeitä. Nämä tiedot ovat keskeisiä lähinnä vain menetelmän sisäisen toimivuuden arvioinnin kannalta.

Saadut taipumat pitää luonnollisesti pystyä yhdistämään tiettyyn mittausajankohtaan ja sijoittamaan tarkasti oikeaan kohtaan tielinjalle. Niinpä TSD:n raakadatan keskeistä sisältöä ovat paaluluvut sekä datapisteen GPS-koordinaatit. Tiedostoon tallentuu myös tieto mittauksen ajankohdasta päivämäärineen ja kellonaikoineen.

Lisäksi kustakin mittauspisteestä tulostuu sekä anturikohtainen mittauksen laatua kuvaava DoppDR-luku (Data bit rate) että pisteessä lasketun taipumasovitteen toimivuutta arvioiva Goodness of fit -kerroin. Näitä laatuparametreja käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.3.

Taipumien laskentaa varten tarvittava keskeinen muuttuja on tieto mittausajoneuvon nopeudesta, jonka korjaaminen vaatii monipuolista tietoa perävaunun liikkeistä. Taipumien laskentaan vaikuttavia tekijöitä ovat paitsi ajonopeuden muutokset, myös tien epätasaisuudesta aiheutuvat vaaka- ja pystysuuntaiset kiihtyvyydet eri kohdissa perävaunua. Kiihtyvyyksianturien lukemien lisäksi raakadataan on taulukoitu näiden perusteella laskettu tien pinnan IRI-arvo. Lisäksi gyroskoopilla on määritetty vaunun kiertymät x-, y- ja z-akselien suhteen. Nämä vaikuttavat myös paikannuksen tarkkuuteen.

Niin ikään TSD-laitteiston tiehen kohdistaman voiman suuruutta monitoroidaan mittauksen aikana. Taipumatulosten vertailtavuuden parantamiseksi mitatuille arvoille tehdään

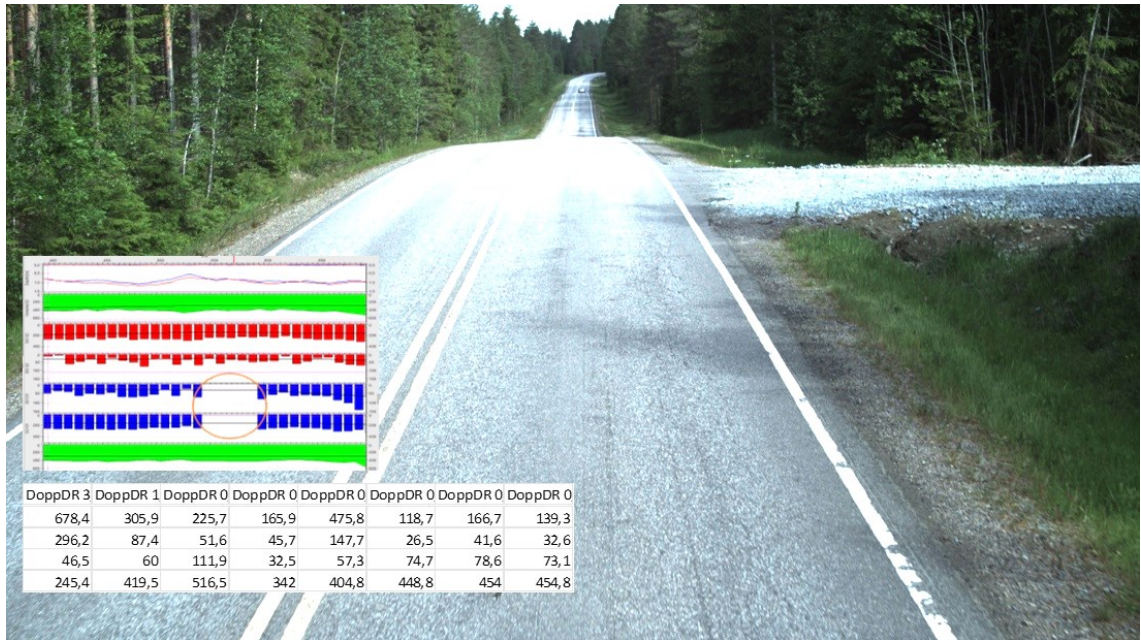


Kuva 35: Huojuntaa aiheuttava reunapainuma ja vanhoja paikkauksia maantien 9241 tieosan 1 paalulla 4000. Pistemäisen vaurion selittänee kuvanottopaikan yksityistieliittymän tukkeutunut tai puuttuva rumpu, joka kerryttää vettä sivuojaan.

5.3 TSD-laaturparametrien arviointi

Kuten kappaleessa 5.2 on todettu, TSD-raakadata sisältää kahdenlaisia tulosten laadullisia tunnuslukuja. Näistä ensimmäinen on kullekin kuudelle mittaavalle anturille sekä verrokkilaserille erikseen kustakin mittauspisteestä tulostuva optisen menetelmän teknistä toimivuutta kuvaava DoppDR-parametri (Data bit rate), jonka raja-arvo on 350 (Sudyka 2016). Normaalitilanteessa parametrin arvo vaihtelee hieman 900 molemmin puolin. Alimmillaan aineistossa esiintyy alle 50 arvoja. Raja-arvon alittavia DoppDR-lukuja saat-
taa esiintyä useammalla anturilla muutamassa perättäisessä mittauspisteessä (Kuva 36). Tällöin niihin liittyy tyypillisesti useamman kymmenen metrin jakso, jolta taipumatieto puuttuu kokonaan. Toisaalta yksittäisen anturin yksittäinen rajan alittava arvo ei välttämättä vaikuta taipumien laskentaan, vaikka pisteessä vastaavan anturin mittaama taipu-
manopeus ja edelleen taipuman kallistuskulma saisivat negatiivisiakin arvoja.

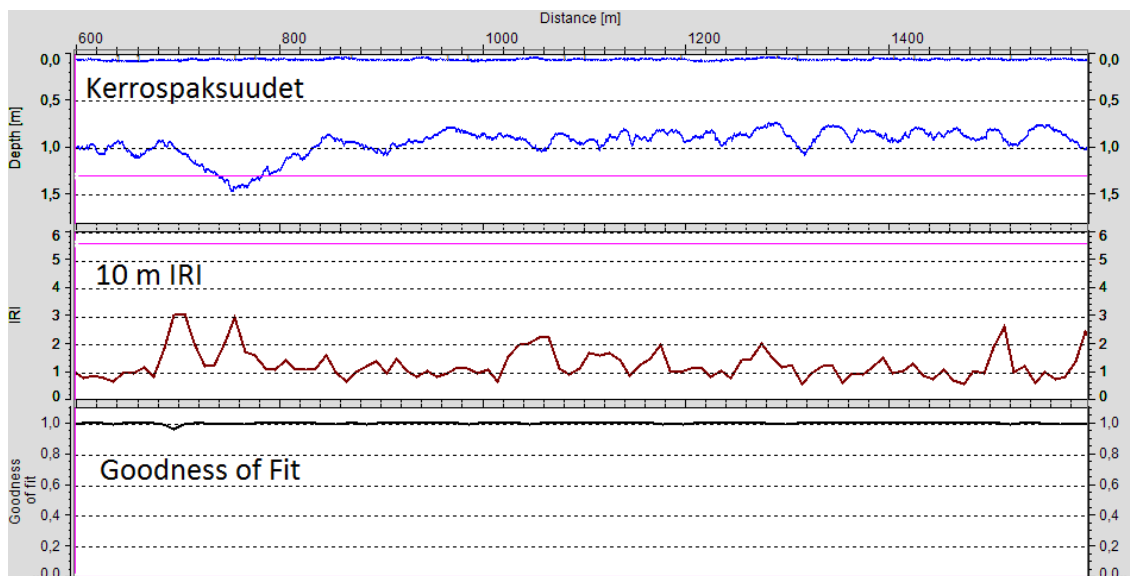
PEHKO-aineistossa erittäin alhaiset DoppDR-arvot ovat melko harvinaisia, niinpä niiden aiheuttajaa on hankala saada selville. Syynä voi olla joko laitteiston hetkellinen häiriö tai jokin ympäristötekijä, jonka vuoksi takaisinheijastuvaa sädettä ei saada rekisteröityä. Kuva 36 esittää kohtaa, jossa kuvaussuunnan mittaus on noin 50 metrin matkalla epäon-
nistunut. Kyseenalaista on, onko optisen menetelmän hetkellisen toimimattomuuden aiheuttanut esimerkiksi liittymän kohdalla anturien puolelta tuleva kirkas auringonvalo. Tien geometria tai pinnan ominaisuudet silmäämäraisen tarkastelun perusteella tuskin selittävät ilmiötä.



Kuva 36: TSD-mittauksen yhteydessä otettu kuva kohdasta, jossa mittaus on paikallisesti epäonnistunut ja DoppDR-arvot ovat alhaisia. Esimerkki on tieltä 58 tieosalta 26 suunnassa 1. RoadDoctorin näkymässä kohta erottuu puuttuvien taipumaparametrien johdosta.

Yhtä kaikki DoppDR ei ole kelvollinen parametri paljastamaan kaikkia ongelmallisia mittauksia. Esimerkiksi kappaleessa 5.1.3 esitellyissä PEHKO-projektin poikkeavia tuloksia tuottaneissa mittauksissa parametri saa lähes säännönmukaisesti täysin tavanomaisia arvoja.

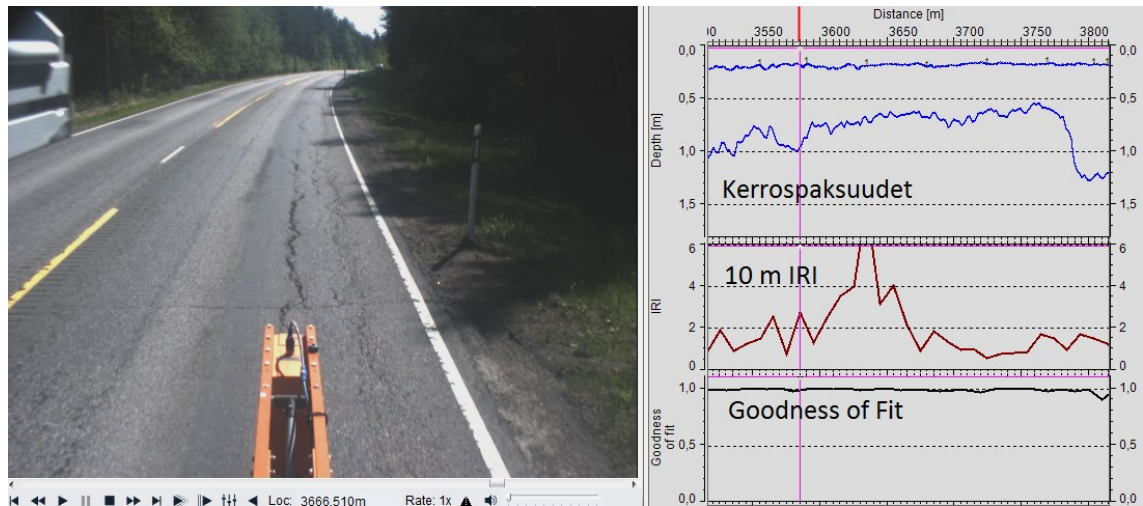
Toinen laadullinen tunnusluku on Goodness of fit, joka on normaali korrelaatiokerroin. Tunnusluku kuvaa, kuinka hyvin rekisteröidyistä taipumanopeuksista lasketut taipuman kaltevuuskulmat ja niistä muodostuva taipumasuppilo vastaavat laskennan perustana olevaa laitevalmistajan mallia. Normaalitapauksessa korrelaatio on erinomainen, korrelaatiokertoimen ollessa lähes säännönmukaisesti yli 0,99 (Kuva 37). Alentuneet Goodness of fit -arvot ovat kuitenkin PEHKO-aineistossa yleisempiä kuin alentuneet DoppDR-arvot.



Kuva 37: Goodness of fit -parametri hyvää dataa tuottavassa mittauksessa kantatien 58 tieosalla 26.

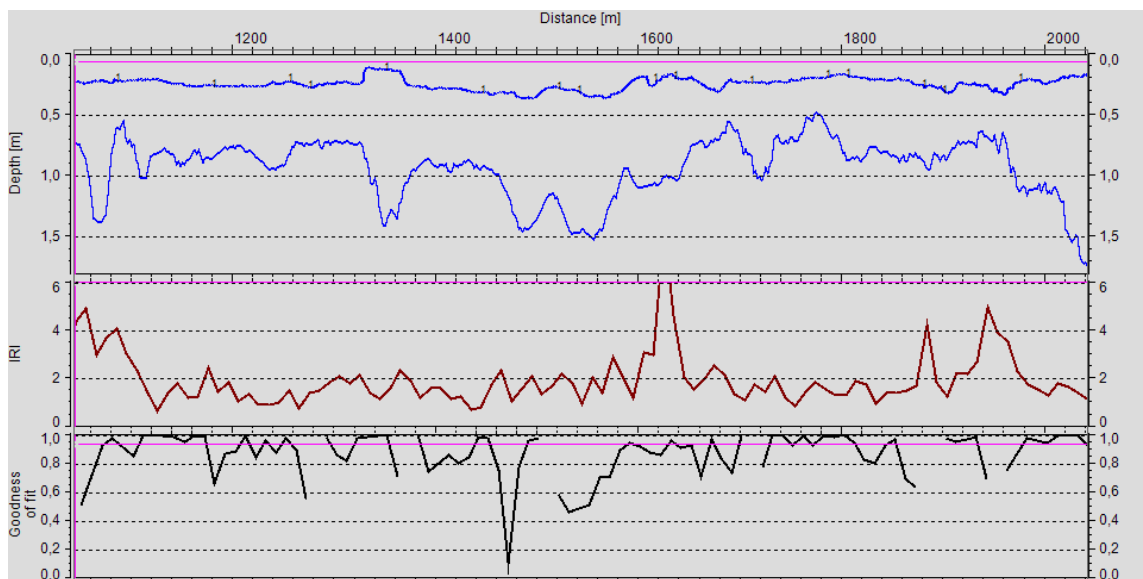
Korrelaatio heikkenee, mikäli TSD-tulosten 10 metrin tarkasteluvälillä rakenteen taipumaominaisuudet muuttuvat voimakkaasti. Niinpä kaikkein huonoin korrelaatio liittyy esimerkiksi muuta tierakennetta huomattavasti jäykempiin betonisiin siltakansiin ja niihin liittyviin siirtymärakenteisiin. Mitenkään säännönmukainen yhteys ei kuitenkaan ole. Alimmillaan korrelaatiokerroin saa tutkitussa aineistossa pistemäisesti arvoja 0,4 – 0,6.

Pienempi, joskin vaihtelevan suuruinen, heikentävä vaikutus Goodness of Fit -parametrin arvoon on myös muilla tien rakenteellisista seikoista johtuvilla äkillisillä ja voimakkailla taipumaominaisuuksien muutoksilla, joihin TSD:n laskentamalli ei aina näyttäisi ehtivän sopeutua. Nämä vaihtelut voivat liittyä joko rakenteen kokonaispaksuuteen, päällystepaksuuteen (paksuilla päällysteillä), pohjamaan laatuun ja jäykkyyteen, kallion pinnan syvyysuuntaiseen sijaintiin, tai esimerkiksi tien alittaviin rumpuihin. Näihin liittyvä vaikutus Goodness of fit -kertoimen arvoon voi vaihdella muutamista sadasosista useisiin kymmenyksiin. Vaikutuksen voimakkuus ja liittyminen muuta rakennetta jäykempiin tai taipuisampiin kerroksiin vaikuttaa pitkälti mielivaltaiselta, kuormitusvasteeltaan homogeenisilla osuuksilla vaihtelua kertoimen arvossa ei kuitenkaan pääsääntöisesti esiinny. Alentunut Goodness of fit -arvo ei myöskään näyttäisi liittyvän päällysteen vaurioihin ja näistä aiheutuviin mittalaitteen äkinäisiin heilahduksiin, sillä IRI-arvon piikit eivät säännönmukaisesti korreloi heikkojen Goodness of fit -arvojen kanssa (Kuva 38).



Kuva 38: Goodness of fit -arvon riippumattomuus päällysteen pituussuuntaisesta epätasaisuudesta ja halkeamista. Esimerkki valtatie 13 tieosalta 128.

Epäonnistuneille mittauksille puolestaan on tunnusomaista erittäin voimakas Goodness of Fit -arvojen hajonta (Kuva 39). Esimerkissä on valtatie 13 tieosalta 134 vastaava näkymä kuin aiemmin kantatieltä 58 (Kuva 37). Goodness of Fit -parametrin hajonta on erittäin voimakasta myös tien 9241 epäonnistuneessa mittauksessa.



Kuva 39: Goodness of fit -arvojen hajonta on voimakasta valtatie 13 tieosan 134 mittauksessa.

Silmiinpistävää ongelmallisimpien tieosien tuloksissa on myös runsas pistejoukko, jolle taipumia ei tulostu lainkaan, ja jolta näinollen myös Goodness of fit -arvot puuttuvat. Näille pisteille tunnusomaista on, että joka anturin kohdalla rekisteröity taipumanopeus ja siitä laskettu taipuman kaltevuuskulma saavat negatiivisia arvoja.

Mikäli vain osa antureista rekisteröi negatiivisia taipumanopeuksia, Goodness of fit -arvo ainoastaan heikkenee hieman. Samoin käy taipumanopeuksien ollessa epäuskottavan suu-

ria. Vastaavat taipumat jäävät joko negatiivisten taipumanopeuksien kohdalla epärealistisen pieniksi, kaukotaipumista tyypillisesti ainakin d_{1500} saa arvon nolla, tai liian suurten taipumanopeuksien kohdalla saavat muuhun aineistoon nähden poikkeavan suuria arvoja. Niinpä ongelmalliset kohteet ovat tunnistettavissa paitsi kohonneen taipuma-arvojen hajonnan, myös alentuneiden Goodness of fit -arvojen perusteella.

Todennäköinen ongelmien aiheuttaja on päällysteen pinnan liiallinen karheus, kuten edellä kappaleessa 5.1.3 esitettiin. Vaikuttaisi siltä, että kokonaan tyhjiksi jääneillä riiveillä 10 metrin liukuva keskiarvo ei kykene tuottamaan millekään anturille järkevää taipumanopeutta. Alentunut Goodness of Fit -arvo puolestaan liittyyneen jaksoihin, joille 10 metrin korjausmenettely toimii osittain.

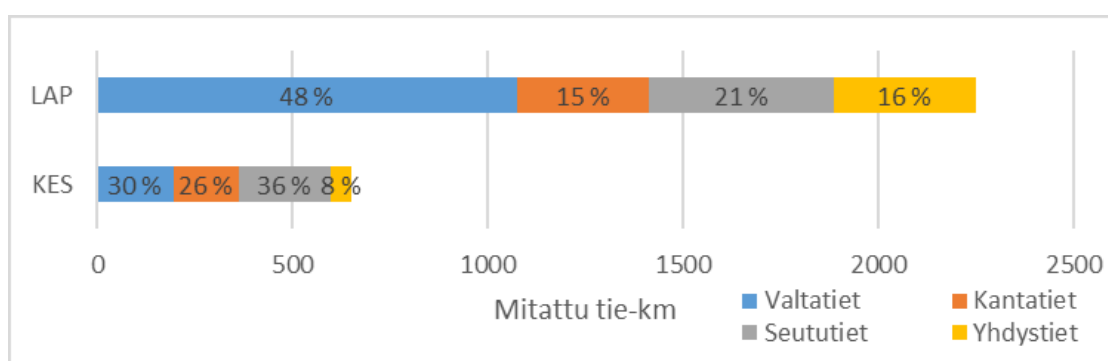
Olettamusta tukee myös, että pisteillä, joilla Goodness of fit -parametrin arvo on alhainen, ei sensorien teknistä toimivuutta kuvaava DoppDR -luku välttämättä reagoi lainkaan. Näissä pisteissä laite rekisteröi ongelmitta heijastavan pinnan lähettämän vasteen, joka ulkoisista tekijöistä johtuen on täysin sattumanvarainen ja josta laskettu taipuma ei vastaa lainkaan rakenteiden todellista taipumakäyttäytymistä.

Todennäköinen syy sille, etteivät esimerkiksi ajouran sivuille päällysteen väsymisen seurauksena syntyvät pituushalkeamat (Kuva 38) juurikaan häiritse TSD-mittausta on, että laseranturit mittaavat poikkisuunnassa erittäin kapeaa linjaa. Näin todennäköisyys sille, että ajouran pituushalkeama osuisi juuri mittalinjalle, on erittäin pieni. Päällysteen purkauksia ja verkkohalkeilua taas osuu mittalinjalle huomattavasti useammin, mutta 10 metrin tulostusväli näyttäisi useimmassa tapauksessa peittävän näiden paikallisen vaikutuksen.

6. TAIPUMAMITTAUSAINEISTOSTA LASKETTAVIEN TIERAKENTEEN KUNTOPARAMETRIEN ANALYYSI

6.1 Taipumasuppiloindeksit PEHKO-kohteilla

Kuva 40 esittää PEHKO-projektin yhteydessä TSD:llä mitatun kokonaiskilometrimäärän jakautumisen Keski-Suomen ja Lapin välillä sekä eri tieluokkien kesken. Päätiestö on mitattu kumpaankin suuntaan, vähäliikenteiset tiet vain yhteen suuntaan.

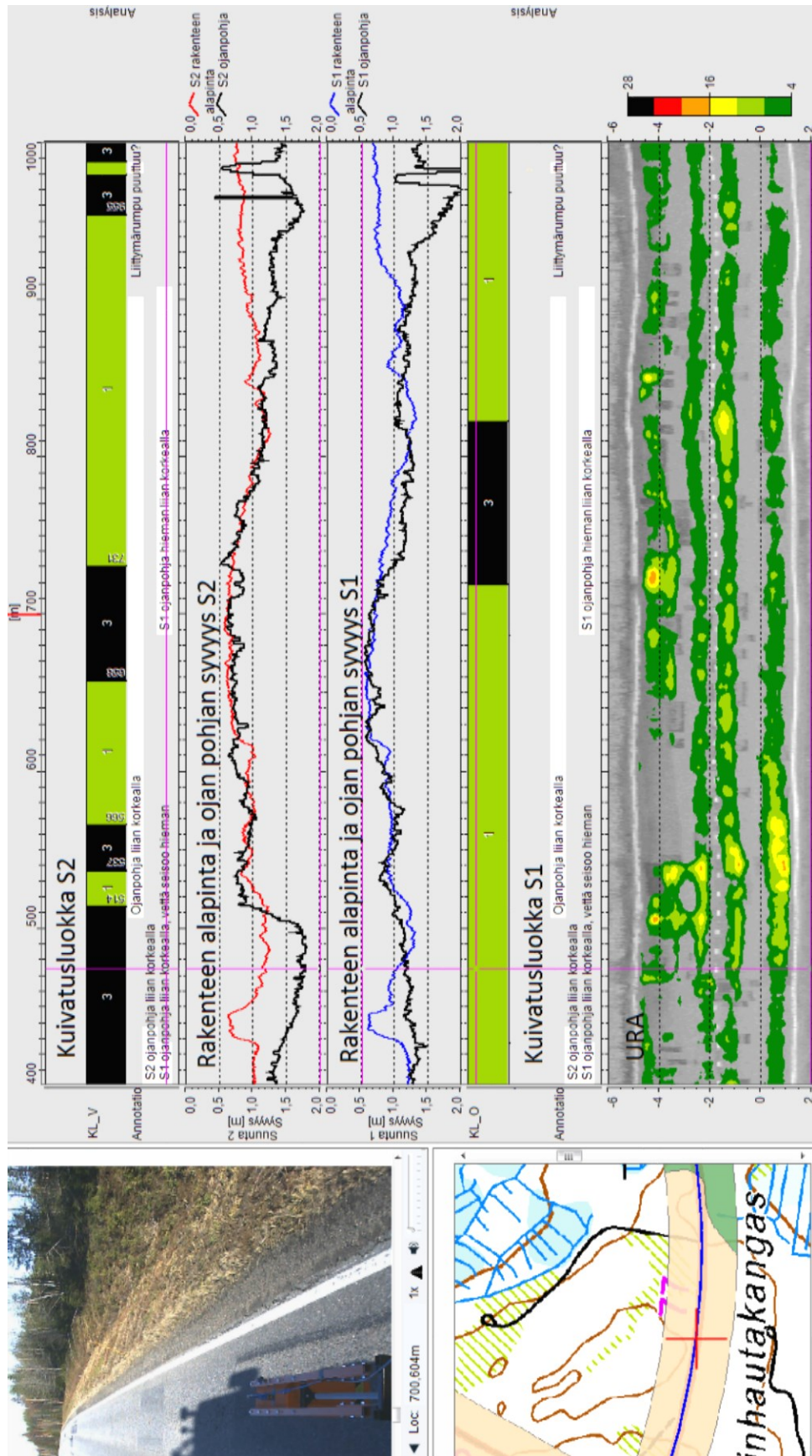


Kuva 40: PEHKO-mittausten kokonaismäärä ja jakautuminen eri tieluokkiin.

Mitatun aineiston analysointi on aloitettu Roadscanners Oy:ssä syksyn 2015 aikana. Analyysien pohjaksi on TSD-taipumista laskettu päällysteen alapinnan venymä sekä SCI- ja BCI-arvot. Tämän työn yhteydessä on koko aineistosta lisäksi määritetty pohjamaan moduuliarvot.

Taipumista laskettujen tunnuslukujen perusteella Keski-Suomen tutkimusalueen päätiestö näyttäytyy yleisesti alempiluokkaista tieverkkoa parempikuntoisena, toki poikkeuksiakin on: kantateiden 58 ja 77 määrätty tieosat ovat huomattavan vaurioituneita ja näille on suositeltu tehtäväksi pikaisia korjaustoimenpiteitä. Tiellä 77 huomionarvoista kevään 2016 mittausaineiston perusteella on paikoitellen erittäin huonosti toimiva kuivatus, mihin osaltaan vaikuttavat alavasta maastosta johtuvat haasteelliset kuivatusolosuhteet.

Kuva 41 esittää näkymää tien 77 kuivatusanalyysistä yhdistettynä kesän 2015 urasyvyyteen. Kuivatusluokka 3 (musta) on huonoin mahdollinen kolmiportaisessa luokittelussa. Laserskannerin pistepilvestä laskettu ojan pohja (musta viiva) on monin paikoin korkeammalla kuin maatutkakuvasta tulkittu tierakenteen alapinta (sininen ja punainen viiva), jolloin vesi pääsee tunkeutumaan rakenteeseen. Nähdään, että lähellä paalua 1000, jossa oja on syvempi, on myös urautuminen vähäisempää kuin paaluvälillä 500 – 900, jolla oja on matala ja rakennepaksuuskin alimmillaan vain hieman yli puoli metriä.



Kuva 41: Ojan pohjan (musta) ja rakenteen alapinnan (punainen/sininen) korkeusasetman ja kuivatusluokan vaikutus urautumiseen kantatien 77 tieosalla 4.

Paikoitellen huonossa kunnossa on myös valtatie 13, jonka määrätyillä tieosilla kesän 2015 ja kevään 2016 mittausten välillä päällystevaurioiden kehittyminen on ollut huomattavaa (Kuva 42). Tosin ainakin osittain tien 13 vauriot ovat bitumin riittämättömästä tartunnasta johtuvia päällysteen purkauksia, eivätkä niinkään rakenteisiin liittyviä tien taipumiin heijastuvia ongelmia.



Kesä 2015



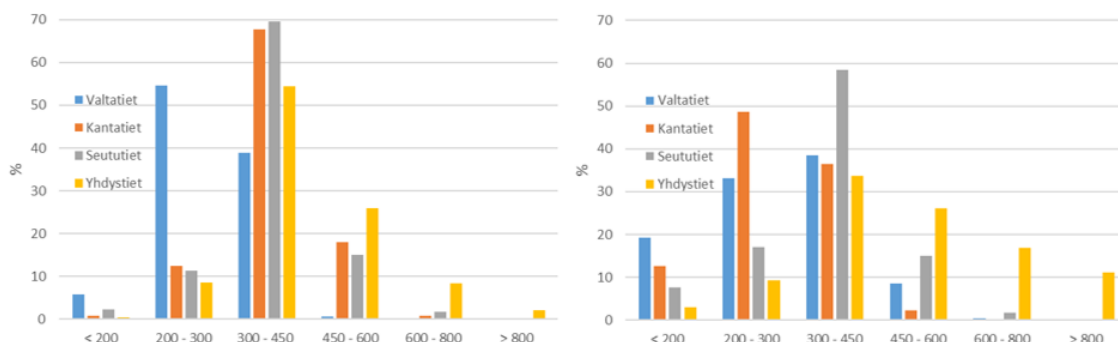
Kevät 2016

Kuva 42: Vaurioiden kehittyminen talven 2015 – 2016 aikana valtatie 13:lla tieosalla 129. Kuva paaluväliltä 1500 – 1600.

Pohjois-Suomen tutkimuskohteiden tulokset noudattelevat sikäli Keski-Suomen suunta- viivoja, että ongelmallisimmat kohdat sijoittuvat alempiluokkaiselle tieverkolle, kun taas päätiestö on rakenteellisesti pääosin paremmassa kunnossa. Keski-Suomesta poiketen päätiestöllä ei ole 58 tai 77 teiden tapaan laaja-alaisesti vaurioituneita kohteita, vaan ongelmat ovat luonteeltaan pistemäisiä.

Venymä

Väsymisvaurioitumisriskiä indikoivan päällysteen alapinnan venymän arvot ovat Keski-Suomen tutkimusalueella pääosin tyydyttävässä luokassa (AB-päällysteillä 200 – 300 μ -strain, PAB-päällysteillä 300 – 450 μ -strain). AB-päällystettyjä ovat kaikki valtatiekoh- teet sekä osa kantateistä. Muu mitattu tiestö on päällystetty käyttäen pehmeillä bitumeilla sidottuja massoja. Kuva 43 esittää PEHKO-alueiden venymätulosten jakauman eri tielu- oissa.



Kuva 43: Päällysteen alapinnan venymän suhteellinen jakauma eri tieluokissa. Vasemmassa kuvaajassa on esitetty Keski-Suomen PEHKO-alue ja oikeassa Lappi.

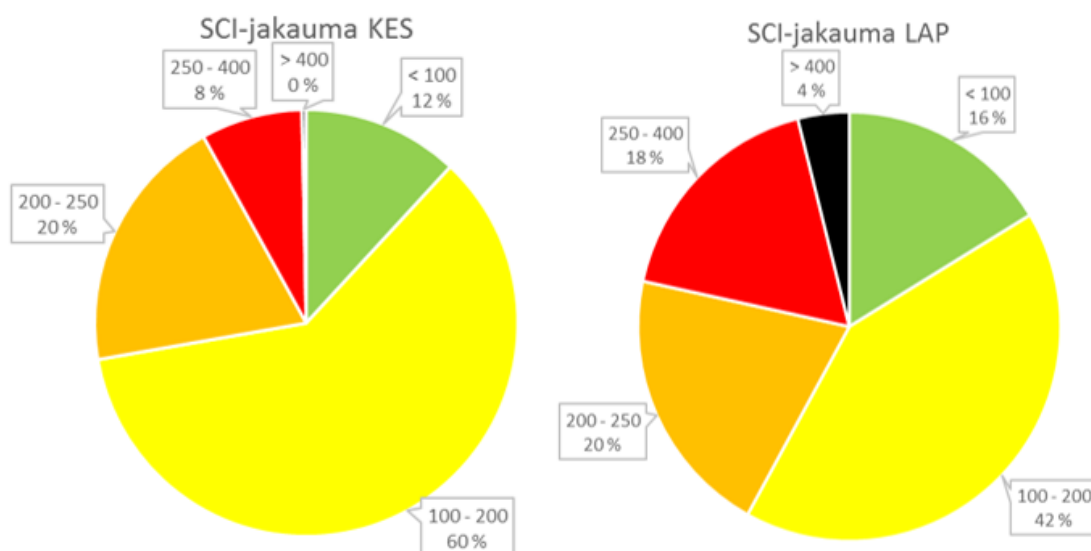
Odotusten mukaisesti Keski-Suomen parhaat venymäarvot on mitattu päätiestöllä, jolla päällystepaksuus on suurin ja uudelleenpäällystämisväli tihein. Huonoimpia venymäarvot ovat yhdysteillä, joista vaurioituvia tai menetettyjä on päällysteen venymän perusteella yhteensä noin 10 %. Huonoimmat arvot painottuvat muutamille teille.

Lapin alueella päällysteen venymäarvojen jakautuminen eri luokkiin on jonkin verran tasaisempaa kuin Keski-Suomessa. Pienimmät venymäarvot painottuvat Lapinkin alueella päätiestölle. Kaikkein vähäliikenteisimpien teiden tilanne on puolestaan huonompi: mitatuista yhdysteistä yli 10 %:lla päällyste on niin pahoin vaurioitunut, ettei pelkkä uusi päällystekerros vanhan laatan päälle enää tuo kestävä ratkaisua rakenteen ongelmiin. Käytännössä 10 % Lapin tutkituista yhdysteistä merkitsee useita kymmeniä tiekilometrejä.

SCI

Pintakantavuutta ja kuvaavat SCI-arvot ovat Keski-Suomen PEHKO-alueella pääosin hyviä (Kuva 44). Keski-Suomen paksupäällysteisillä valtatiekohteilla arvot ovat vielä huomattavasti muuta tutkittua tiestöä alhaisempia. Kanta-, seutu- ja yhdysteiden tulosten jakauma luokkiin hyvä, välttävä ja huono on melko tasainen. Huonoja arvoja on mitattu eniten yhdysteiltä. Näistä kuitenkin yli neljäsosa kuuluu hyvään luokkaan, jossa SCI-arvo vaihtelee välillä 100 – 200. Erittäin huonoja arvoja esiintyy käytännössä vain yhdystieluokassa. Venymän tavoin myös kaikkein heikoimmat SCI-arvot painottuvat muutamille eri tieluokkiin kuuluville teille.

Lapissa sen sijaan yli 20 % mitatuista SCI-arvoista ylittää 250 rajan. Määrä alkaa olla huomattava. Näistä 4 % kuuluu kaikkein huonompaan luokkaan, jossa vaurioituminen on edennyt jo pitkälle. Toisaalta myös alhaisimman SCI-luokan (< 100) suhteellinen osuus on aavistuksen suurempi kuin Keski-Suomessa, jossa mitatut SCI-arvot painottuvat Lapia selkeämmin välille 100 – 200.



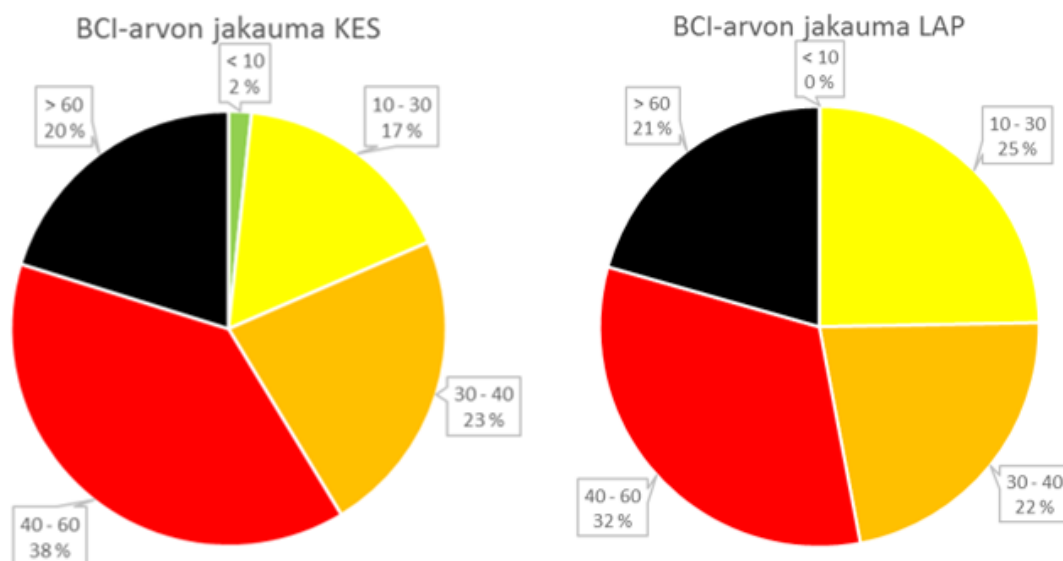
Kuva 44: SCI-arvon jakauma Keski-Suomen (vas.) ja Lapin (oik.) PEHKO-alueilla.

Lapissakin päätiestö on varsin hyväkuntoinen. Pääteiden SCI-arvot kuuluvat lähes säännönmukaisesti erinomaiseen tai hyvään luokkaan, huonot jaksot ovat luonteeltaan paikallisia ja täsmäkorjauksin kunnostettavissa. Alempiluokkaisen tieverkon tilanne on puolestaan huonompi. Osalla alemman verkon teistä SCI on laaja-alaisesti koholla ja kunnostustoimenpiteitä vaaditaan pitkille matkoille. Tilastollisesti näillä PAB-päällystetyillä teillä SCI-arvot ovat joko välttäviä tai huonoja lähes puolella koko mitatusta kokonaismäärästä. Erinomaisia venymäarvoja saa vain alle 15 % mitatusta alempiluokkaisen tieverkon kokonaispituudesta. Osaltaan PAB-kohteiden huonommat tulokset selittyvät sillä, että SCI-arvojen luokkarajat ovat AB- ja PAB-päällysteillä samat. Etupäässä tulokset heijastelevat kuitenkin vähäliikenteisen tiestön pitkää päällystysväliä ja ikääntyneiden päällysteen ja kantavan kerroksen huonoa kuntoa.

Pohjamaa ja alusrakenne

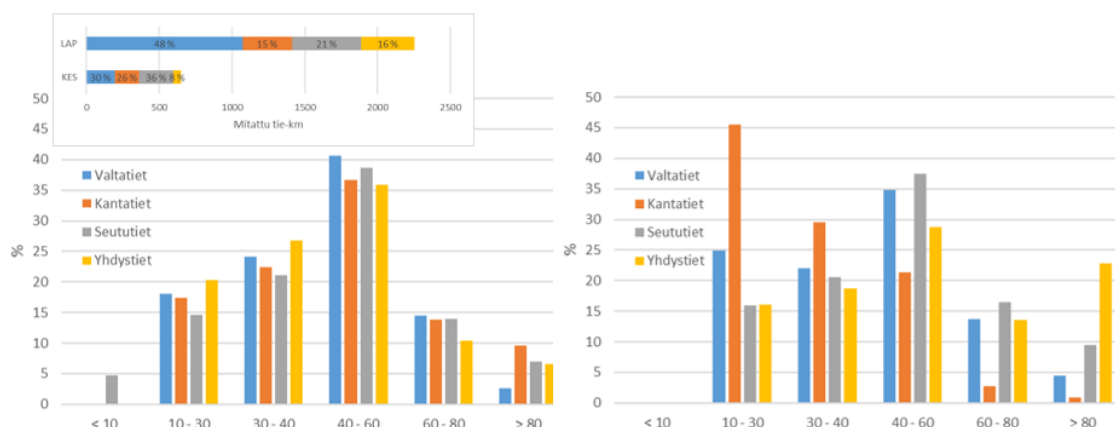
Kuva 45 esittää pohjamaan muodonmuutosriskiä kuvaavien BCI-arvojen jakauman erikseen sekä Keski-Suomen että Lapin tutkimusalueilla. Kokonaisuutena tarkastellen BCI-arvot ovat tutkituilla teillä melko korkeita. Tulosten moodiarvo osuu sekä Keski-Suomessa että Lapissa luokkaan välttävä (40 – 60). Ilmiö on jossakin määrin yllättävä, sillä tyypillisesti huonoa pintakantavuutta on pidetty Suomen tiestöllä suurempana ongelmana kuin pohjamaan ja alusrakenteen deformaatiokestävyyttä. Nyt tutkituilla alueilla SCI-arvot ovat verraten hyviä, kun taas kummallakin alueella selkeästi yli puolet mitatusta tiestöstä kuuluu BCI-arvon perusteella luokkiin välttävä tai huono.

Välttävän rajana pidetään BCI-arvoa 40. Tämän ylittyessä suuri kokonaisliikennemäärä ja erityisesti korkea raskaiden ajoneuvojen osuus johtavat erittäin suurella todennäköisyydellä pohjamaan deformatumiseen sekä sitä seuraaviin rakenteen vaurioihin. Teillä, joilla indeksin arvo ylittää 60, syntyy vaurioita jo verraten harvalukuisilla raskaan liikenteen kuormituskerroilla. Tällaista jaksoa on noin viidennes niin Keski-Suomen kuin Lapin tutkimusalueiden kokonaismäärästä.



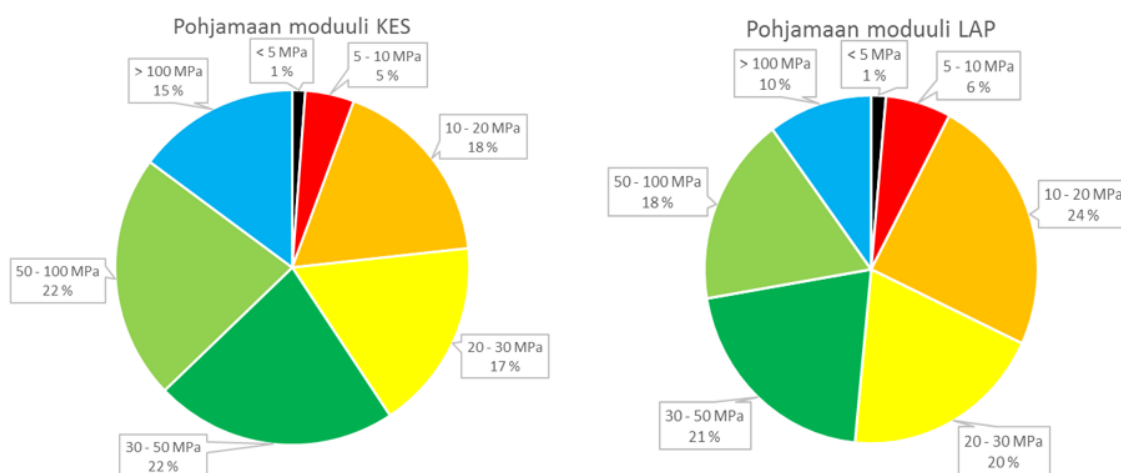
Kuva 45: BCI-arvon jakauma Keski-Suomen (vas.) ja Lapin (oik.) PEHKO-alueilla.

Tieluokittain tarkasteltuna Keski-Suomen BCI-arvot jakautuvat hyvin tasaisesti. Sekä hyviä että huonoja arvoja esiintyy melko tasaisesti eri tieluokissa. Lapissa taas BCI-arvon jakautumisessa tieluokkiin on selkeämpiä eroja: Valta- ja erityisesti kantatiekohteet erottuvat vähäliikenteisempiä teitä parempina. Silmiinpistävää on lisäksi, että Lapin mitatuista yhdysteistä noin 35 %:lla BCI on yli 60, kun muissa tieluokissa indeksin arvo on näin korkea vain noin 10 – 25 %:lla tutkitusta kokonaispituudesta. Tieluokittaiseen tarkasteluun on lisäksi eroteltu yli 80 BCI-arvot erikseen. Tällä tasolla tien pinnalla on jo tyypillisesti havaittavissa vakavia pohjamaan tai alusrakenteen muodonmuutoksista aiheutuneita vaurioita, kuten reunapainumia sekä näihin liittyviä päällystevaurioita, ja tien palvelutaso on voimakkaasti alentunut. Tämän kaltaisia jaksoja on kesän 2015 aineiston perusteella kaikissa tieluokissa.



Kuva 46: BCI-arvon prosentuaalinen jakauma kunkin tieluokan sisällä. Vasemmassa kuvaajassa on esitetty Keski-Suomen PEHKO-alue ja oikeassa Lappi. Ylhäällä vaakapalkeissa on kuvattu laskennassa käsiteltyjen tiekilometrien jakautuminen eri luokkiin (ks. Kuva 40).

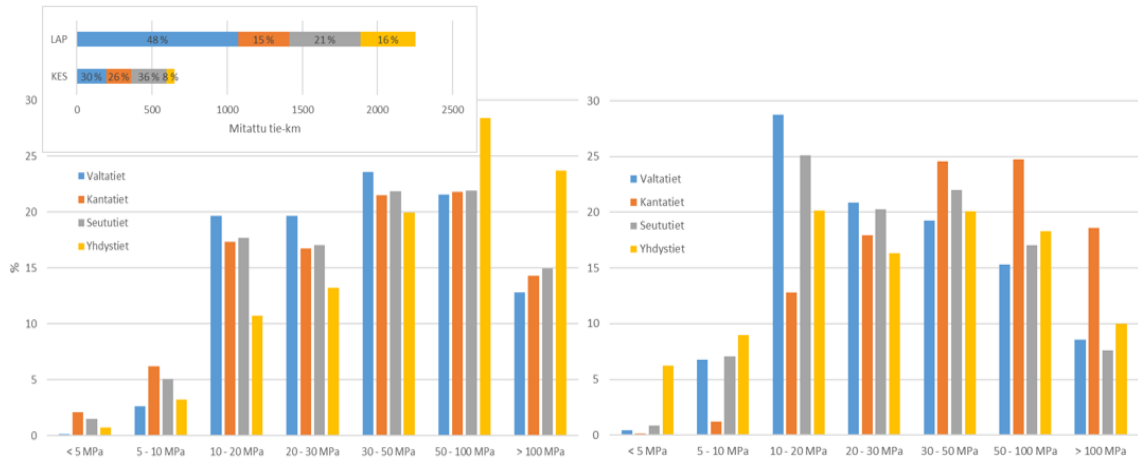
Kuva 47 esittää TSD-tuloksista kaavalla (11) laskettujen pohjamaan ja alusrakenteen moduuliarvojen jakauman Keski-Suomen ja Lapin tutkimusalueilla. Tilastollisessa tarkastelussa ovat mukana kaikki alle 200 MPa moduuliarvot.



Kuva 47: Pohjamaan moduuliarvon jakauma Keski-Suomen (vas.) ja Lapin (oik.) PEHKO-alueilla.

Roadscanners Oy:ssä tehtyjen laskelmien perusteella pohjamaan moduuliarvoa 20 MPa pidetään rajana, jonka alapuolella moduuliarvon pieneneminen alkaa kasvattaa yhden 72-tonnisen rekan synnyttämää kumulatiivista pohjamaan taipumaa voimakkaasti. Tätä korkeammilla moduuliarvoilla tilanne paranee siten, että 30 MPa ylittävillä pohjamaan moduuleilla ei samaa kuormitusta vastaava taipuma enää juurikaan pienene. Hieman alle 20 MPa pohjamaan moduulia voidaan kuitenkin pitää vielä hyväksyttävänä, sen sijaan 10 – 15 MPa on todettu kriittiseksi rajaksi, jonka alittuessa tie kärsii selkeistä kantavuuspuutteista. 10 MPa rajan alittaa 6 % Keski-Suomen tutkittujen teiden pohjamaan moduuleista. Lapin alueella osuus on vielä hieman suurempi, noin 7 %.

Tieluokittaisessa tarkastelussa hajontaa on jonkin verran (Kuva 48). Alhaisia moduuliarvoja on kuitenkin laskettu niin vilkkailta pääteiltä kuin vähäliikenteisemmiltäkin väyliltä. Silmiinpistävää aineistossa on Lapin valtateiden melko runsas 20 MPa alittavien moduuliarvojen määrä. Koska Lapin valtateiden mittauspituus on ylivoimaisesti suurin (Lähes 50 % koko Lapin mitatusta tieverkosta ja noin 37 % koko PEHKO-aineistosta), merkitsee se myös huomattavaa absoluuttista tiekilometrimäärää, jolla pohjamaan ja alusrakenteen kantavuus on jossakin määrin puutteellinen.



Kuva 48: Pohjamaan moduulin prosentuaalinen jakauma kussakin tieluokassa. Vasemmassa kuvaajassa on esitetty Keski-Suomen PEHKO-alue ja oikeassa Lappi. Ylhäällä vaakapalkkeissa on kuvattu laskennassa käsiteltyjen tiekilometrien jakautuminen eri luokkiin (ks. Kuva 40).

Kaikkein heikoimpien pohjamaan moduulien nähdään liittyvän korkeimpien BCI-arvojen tavoin Kemi-Tornion hoitourakka-alueen yhdysteihin. Näin ollen on perusteltua olettaa, että Lapin korkeat BCI-arvot selittyvät ohuiden rakennekerrosten ohella nimenomaan huonosti kantavalla tiepohjalla (erityisesti turve). Koska Keski-Suomessa tilanne on vähäliikenteisten teiden osalta huomattavasti parempi, voidaan johtopäätöksenä todeta, että Keski-Suomessa yhdystiet on lähtökohtaisesti linjattu kantavammalle maapohjalle kuin Lapissa.

Myös kuivatuspuutteiden yhteys kohonneeseen BCI-arvoon on tullut esiin PEHKO-mittausten tulosten analyysin yhteydessä. Erityisen selkeästi lukuisat kuivatuspuutteet oli havaittavissa vuonna 2016 Keski-Suomen kevätmittausten aikana. Tuolloin ojissa seisovaa vettä tavattiin huomattavan monissa paikoissa (Kuva 49).



Kuva 49: Kuivatuspuutteista kärsivää tiejaksoa Keski-Suomen PEHKO-alueella kantatien 77 tieosalla 4.

6.2 TSD- ja PPL-tulosten vertailu tutkituilla tieosilla

TSD- ja PPL-menetelmien tuottamia tuloksia on vertailtu luvussa 4.1 esitetyillä tieosilla (Taulukko 4). Kovin laajamittaista ja luotettavaa menetelmien keskinäistä riippuvuutta selvittävää tutkimusta ei näin pienellä PPL-referenssiaineistolla ole mahdollista tehdä. Sen vuoksi tässä yhteydessä käsitellään myös aikaisempien Destian tilaamien TSD-mittausten pohjalta tehtyjä havaintoja TSD- ja PPL-menetelmien vertailevista kokeista Suomen tiestöllä. Destian mittaukset on tehty Kaakkois-Suomessa käsittäen noin 250 mitattua tiekilometriä, joten kovin laajamittaisesta aineistosta ei siinäkään ole kyse.

Vertailu antaa kuitenkin suuntaviivoja siitä, kuinka TSD-menetelmä soveltuu suomalaiselle tiestölle, joka poikkeaa rakenteellisilta ominaisuuksiltaan melko radikaalisti olosuhteista, joihin TSD on alun perin kehitetty ja joissa sitä ulkomailla pitkälti käytetään. Kuvaavaa on IBDiM:n mittaajien toteamus, etteivät he ennen Suomea ole milloinkaan mitanneet laitteellaan yli 500 μm kokonaistaipumia (Saarenketo 2016). Niinpä Suomen mittaukset koettelevat koko TSD-menetelmän rajoja.

6.2.1 Havaintoja PEHKO-aineiston analyysistä

Mittausmenetelmien tilastolliseen vertailuun on valittu SCI- ja BCI-arvot sekä päällysteen alapinnan venymä, jotka ovat pohjoismaisessa diagnostiikassa keskeisimpiä taipumamittauksista hyödynnettäviä tunnuslukuja. Vertailtavuuden vuoksi tulokset on normalisoitu lämpötilan suhteen kappaleen 3.3 sekä venymän osalta kaavan 7 esittämien menetelmien mukaisesti.

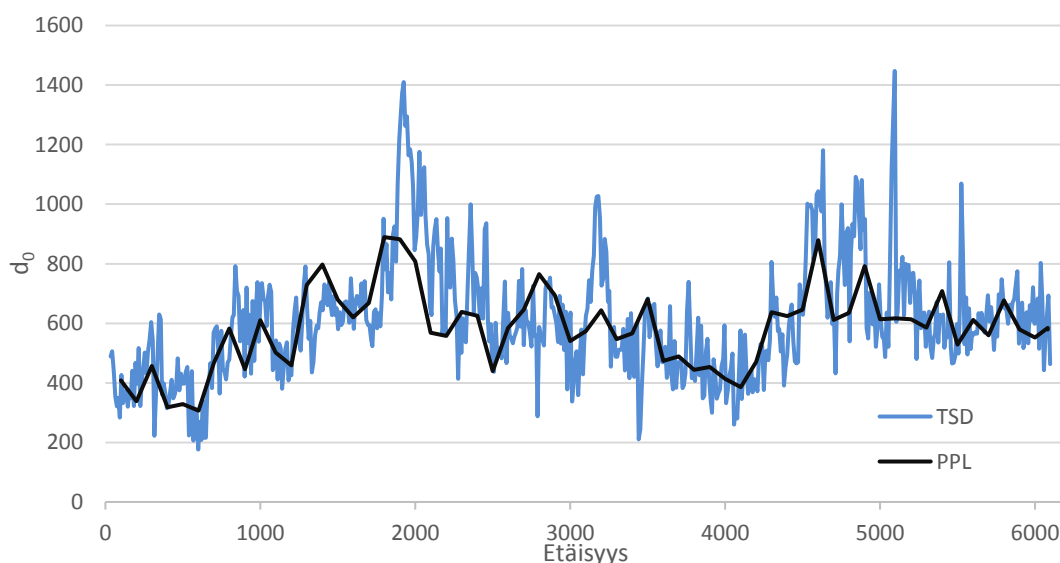
TSD- ja PPL-taipumien perusteella laskettujen tunnuslukujen korrelaatio on esitetty liitteen A kuvaajissa. PEHKO-projektin analyysijä varten Keski-Suomen ja Lapin mittausaineistot on koottu omiksi projektiryhmikseen, joten tilastollisen tarkastelunkin yhteydessä on ollut luontevaa käsitellä alueita erillisinä kokonaisuuksina.

Liitteen A kunkin kuvaajan vaaka-akselilla on esitetty TSD-tulokset ja pystyakselilla näitä vastaavat PPL-taipumiin perustuvat arvot. Kuvaajiin piirretty vihreä suora edustaa korrelaatiokertoimen arvoa 1, eli verrattavien tietueiden täydellistä lineaarista riippuvuutta. Sini-punainen alue kattaa 80 % otosjoukon alkioista, mustien viivojen väliin jää puolestaan 90 % alkioista. Alkioiden lukumäärä kussakin luokassa on esitetty numeerisesti vaaka-akselin alapuolella.

TSD- ja PPL-tulosten keskinäisen korrelaation kannalta Keski-Suomen ja Lapin alueet näyttäytyvät erilaisina. Lapissa vertailtujen menetelmien tuottamien tunnuslukujen korrelaatio on kohtalaisen hyvä, kun taas Keski-Suomen tuloksissa menetelmien välinen riippuvuus ei näyttäydy läheskään yhtä selkeänä.

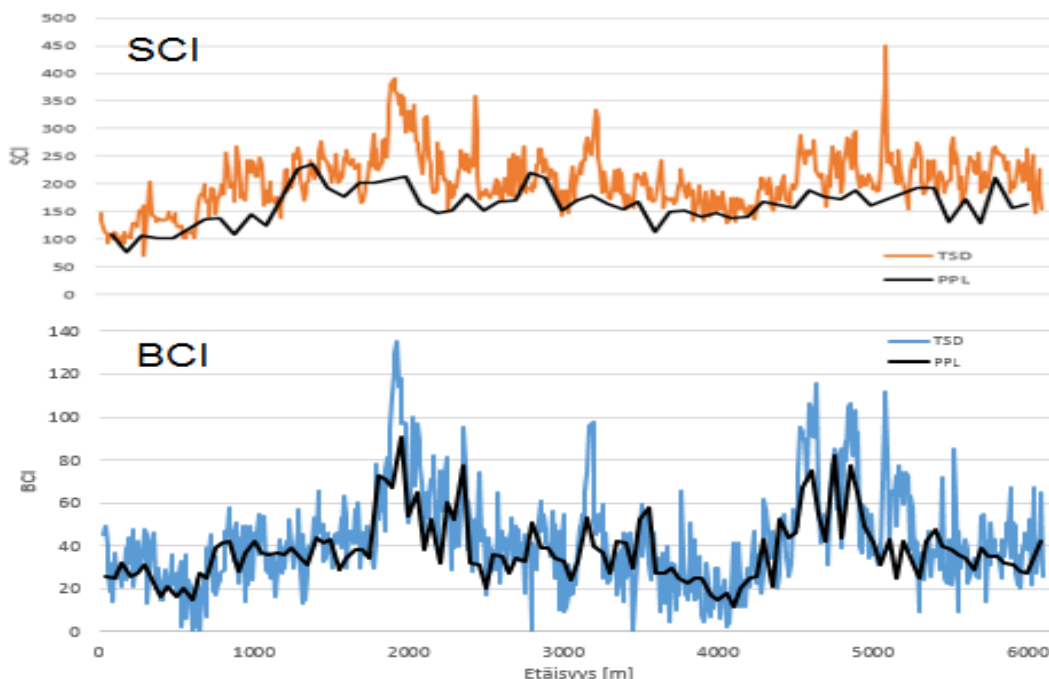
Tämän työn puitteissa tutkitun aineiston pohjalta voidaan lisäksi todeta, että valtaosalla kohteista TSD mittaa lämpötilakorjauksen jälkeenkin aavistuksen pudotuspainolaitetta suurempia maksimitaipuman arvoja. Maksimitaipuman keskiarvo maantien 924 esimerkissä (Kuva 50) on pudotuspainolaitteella 595 μm , ja TSD:llä mitattuna vain 2,7 % suurempi. Paksumpipäällysteisillä teillä tilanne muuttuu siten, että erot tasoittuvat tai TSD-taipumat saattavat jäädä jopa PPL-taipumia alhaisemmiksi (Kuva 57).

Taipuman pituusprofiileista nähdään, että TSD:n rekisteröimät yksittäiset taipumahuiput kasvattavat hieman menetelmien tuottamien taipumien keskiarvojen erotusta, mutta myös maksimitaipuman mediaani on tien 924 esimerkissä TSD:llä mitattuna jonkin verran PPL:n mediaania suurempi. Edelleen myös TSD-taipumiin perustuvat SCI ja BCI saavat valtaosalla tutkituista kohteista keskimäärin hieman suurempia arvoja kuin PPL-taipumista lasketut vastaavat indeksit (Kuva 51).



Kuva 50: Menetelmien vertailu, maksimitaipuma mt 924 tos 1.

Lisäksi liitteen A kuvaajista ja kappaleen 6 pituusprofiileista nähdään, että TSD-tulosten hajonta on sekä taipumien että niistä laskettujen tunnuslukujen osalta säännönmukaisesti vastaavien PPL-tulosten hajontaa suurempi. Erityisen selkeästi havaitaan, että PPL ei kykene erottamaan kaikkia TSD:n rekisteröimiä taipumahuippuja, tai vaihtoehtoisesti erottaa ne huomattavasti lievempinä kuin TSD. TSD-tulosten yksittäiset piikit heikentävät myös jonkin verran menetelmien korrelaatiota aiheuttaen liitteen A kuvaajien yläpään vääristymää.



Kuva 51: Taipumamittausmenetelmien tuottamien tulosten vertailu, SCI- ja BCI-arvot mt 924 tos 1. PPL-tulokset on esitetty mustalla värillä.

6.2.2 Aiemmat havainnot suomalaiselta tiestöltä

Destian kesän 2013 TSD-pilottimittauksista on keväällä 2016 julkaistu ensimmäinen tuloksia laajemmin käsittelevä tutkimusraportti. Tämän Pertti Virtalan (2016) julkaisun pääpaino on pyrkimyksessä kartoittaa edellytyksiä nykyistä paremman tien rakenteellista kuntoa kuvaavan tunnusluvun luomiseen käyttäen kuormitus- ja rakenneanalyyskejä sekä vastelaskentaa kestävyysanalyysineen, mutta osana tutkimusta esitellään TSD:n käyttökokemuksia ja vertaillaan saatuja tuloksia PPL:n tuottamaan tietoon.

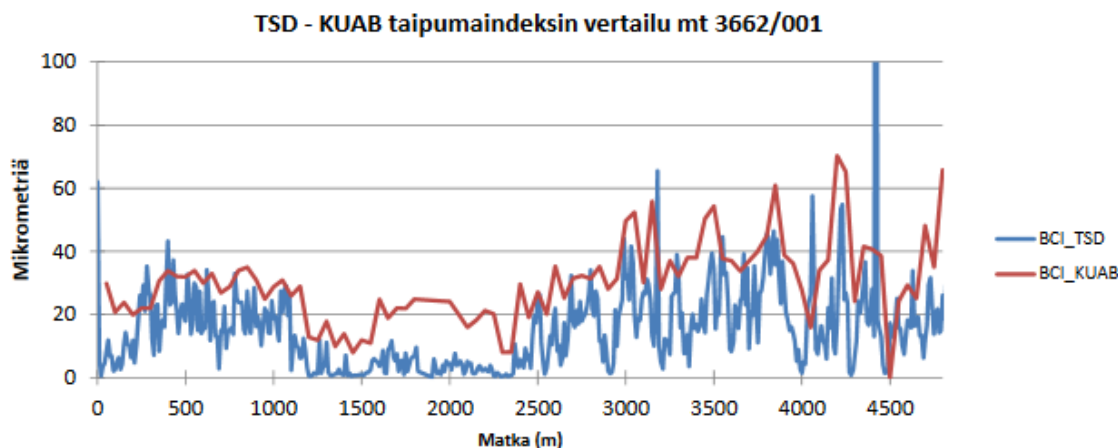
Rakenteellisen kunnon hyödyntämisen pullonkaulaksi tieomaisuuden kunnonhallinnassa Virtala nimeää juuri jatkuvan taipumatiedon puuttumisen. Aiemmin kerätty pistekohtainen verkkotason taipumatieto ei ollut tarpeeksi edustavaa, jotta sen perusteella määritetty rakenteellinen kunto olisi korreloinut tien vaurioiden kanssa. Niinpä kunnonhallinnan painopiste siirtyi lähes yksinomaan tien pintakuntoon perustuvaksi.

Ongelmana on tällöin, että korjaustoimenpiteet kohdistuvat vain näkyviin vaurioihin, toisin sanoen oireisiin, varsinaisen taustalla vaikuttavan mekanismin sijaan. Lisäksi vaarana on, että kunnostustoimenpiteisiin ryhdytään liian myöhään. Tutkimustieto osoittaa, että esimerkiksi oikea-aikaisella uudelleenpäällystyksellä rakenteen kestoikää voidaan kasvattaa huomattavasti, mutta jo halkeilleen päällystelaatan massapintauksella vastaavaa hyötyä ei saavuteta, vaan uusikin päällyste vaurioituu nopeasti. Niinpä tieto rakenteellisesta kunnosta ja vaurioitumisriskin suuruudesta on ensiarvoisen tärkeää niin toimenpiteiden oikean kohdistamisen kuin ajoittamisenkin kannalta.

Virtala (2016, s. 52) on tehnyt havainnon, että TSD tuotti pääasiassa hieman pienempiä maksimitaipumia kuin PPL, eli tilanne oli päinvastainen kuin PEHKO-aineiston kohdalla. Ainoastaan TSD-taipumien saadessa paikallisesti erittäin suuria arvoja, jäivät PPL-taipumat alhaisemmiksi. Sikäli siis Virtalan havainnot ovat linjassa PEHKO-aineiston havaintojen kanssa, että jatkuvan mittauksen arvojen hajonta on pistemäistä mittausta suurempi ja jatkuvan mittauksen taipumahuiput jäävät pudotuspainolaitteella kokonaan tai osittain tunnistamatta.

Sytä vuosien 2013 ja 2015 mittausten päinvastaisiin trendeihin voidaan hakea mittaushetkellä vallinneista olosuhteista. Kesän 2013 TSD- ja PPL-mittauksissa ero päällysteen keskimääräisessä pintalämpötilassa on ollut vain muutaman asteen luokkaa ja mittaukset on tehty 5 – 10 °C välillä, eli huomattavasti Roadscannersin v. 2015 teettämiä TSD-mittauksia viileämmissä sääoloissa (Taulukko 7). Käytetystä lämpötilakorjauksesta ei ole mainintaa, todennäköisesti on käytetty Road Doctorin tapaan TPPT-menetelmän mukaista korjausta, tai vaihtoehtoisesti on verrattu lämpötilakorjaamattomia arvoja mittauslämpötilojen eron ollessa melko vähäinen.

Mielenkiintoinen havainto kesän 2013 tuloksista on lisäksi, että menetelmien tuottamien taipumien tasoero kasvoi sitä mukaa, mitä kauempana kuormituspisteestä taipuma rekisteröitiin. Luonnollisesti tämä heijastuu myös taipumista laskettavien parametrien arvoihin. Esimerkiksi TSD:n ja PPL:n SCI-käyrien Virtala raportoi olevan hyvin yhteneväiset, mutta BCI-käyrissä tasoero oli selkeä, korkeimmillaan TSD-piikkejä lukuun ottamatta tyypillisesti noin 20 yksikköä (Kuva 52). Kaukotaipumienkin vertailussa PPL tuotti suurempia arvoja kuin TSD. (Virtala 2016, s. 50 – 51)



Kuva 52: TSD:n ja PPL:n BCI-profiilien vertailu eräällä kesän 2013 mittauskohteella (Virtala 2016, s. 51).

6.2.3 TSD- ja PPL-taipumien eroja selittävät tekijät

Monissa tutkimuksissa on todettu tierakenteen taipumien olevan pitkälti riippuvaisia mittaajankohdan olosuhteista, erityisesti tienpinnan vallitsevasta lämpötilasta ja rakenteen kosteustilasta. Myös mittausajoneuvon nopeus vaikuttaa kuormitus aikaan, jolla on jonkin verran vaikutusta rakenteen käyttäytymiseen ja mitattuihin TSD-taipumiin, mutta merkittäväksi nopeustekijä muodostuu vasta erittäin alhaisissa nopeuksissa (< 38 km/h). Näissä nopeuksissa mitatut taipumat ovat Suomessa käytetyillä mittausasetuksilla kuitenkin suodattuneet automaattisesti pois TSD:n tulostiedostoista.

Tien rakennekerrokseen tunkeutunut vesi puolestaan alentaa rakennekerrosten jäykkyyttä ja kasvattaa muodonmuutoksia kosteudelle altistuvissa kerroksissa. Kosteustilan vaikutus rakenteen kuormituskestävyydelle on merkittävä etenkin routakautta seuraavan sulamispehmenemisen aikaan, mutta mahdollisesti myös kesäkaudella olosuhteiden vaihdellessa voimakkaasti. PEHKO-projektin taipumamittauksen aikana vallinneesta kosteustilasta ei ole saatavilla tarkkaa tietoa, koska taipumamittaukset on tehty eriaikaisesti kosteustilasta viitteitä antavien maatutkausten ja videointien kanssa, mutta oletettavaa on, ettei kosteus-tila ole tässä kohtaa ratkaiseva TSD- ja PPL-tulosten erojen kannalta.

Mittaushetkiselä lämpötilavaihtelulla sitä vastoin on kiistatta vaikutusta tuloksiin. Kohonnut tierakenteen lämpötila vaikuttaa alentamalla etenkin bitumilla sidotun päällysteen ja mahdollisen sidotun kantavan kerroksen yläosan jäykkyyttä. Päällystekerroksen ollessa paksu, voi ilmiöllä voi olla suuri vaikutus koko rakenteenkin jäykkyyteen.

Taulukko 7 esittää mittaushetkellä vallinneen keskimääräisen pintalämpötilan kullakin tutkitulla vertailutiellä. Etenkin Keski-Suomen mittauksen aikaan olosuhteet TSD- ja PPL-mittauksen välillä ovat poikenneet suuresti sekä toisistaan että standardilämpötilasta. Keski-Suomen TSD-mittaukset on tehty heinäkuun alussa erittäin helteisissä olosuhteissa, kun taas referenssimenetelmänä käytetyt PPL-mittaukset on tehty huomattavasti viileämpänä ajankohtana alkusyksystä. Lapin kohteilla lämpötilavaihtelu on ollut pienempää. Lisäksi Lapin kohteille on leimallista keskimäärin ohuempi päällystepaksuus.

Taulukko 7: PEHKO-projektin TSD/PPL-vertailutiesat, keskimääräinen päällystepaksuus sekä mittaushetkinen päällysteen pintalämpötila.

	Tie	Tos	Pit [m]	Päällyste [mm]	T _{mit} PPL [°C]	T _{mit} TSD [°C]	
						S1	S2
Keski-Suomi	58	26	2544	45	6,5	24,3	23,1
		27	288	45	6,8	23,4	22,4
		38	4506	vaihtelee	8,6	30,8	29,8
	77	1	4233	165	4,9	30,3	21,1
		4	1482	140	3,2	29,1	21
Lappi	923	1	5143	68	10,3	16,6	17,1
		2	7551	51	11	15,7	16,2
		3	4677	44	11	15,1	15,7
		4	osittain	47	12,3	17,2	16,5
		8	osittain	40	13,7	17,8	17,3
	924	1	6100	100	10,7	16,1	15,1
	19538	1	6225	40	10,2	23	23,9

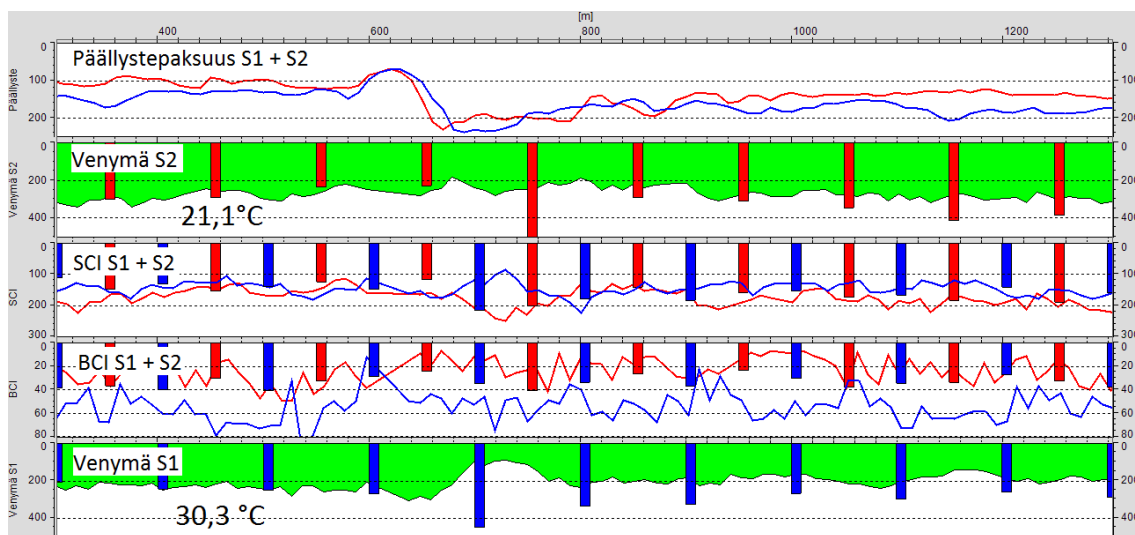
Tien 77 mittauksen tulokset havainnollistavat erinomaisesti lämpötilan vaikutuksen TSD-tuloksiin ja niiden PPL-korrelaatioon. Tien kasvu- ja laskusuuntien TSD-mittausten aikaiset keskimääräiset pintalämpötilat eroavat toisistaan lähes 10 °C (Taulukko 7). Suuntien sisällä lämpötilavaihtelu on ollut vähäistä. Tiet ovat tavanomaisesti poikkisuunnassa kohtalaisen homogeenisia, joten lämpötilakorjauksen jälkeen taipumien ja niistä lasket- tujen parametrien pitäisi olla suunnilleen samaa suuruusluokkaa kummassakin mittaus- suunnassa.

Road Doctorin näkymään (Kuva 53) on koottu sekä jatkuvan että pistekohtaisen taipu- mamittauksen tuloksista laskettujen parametrien arvoja noin kilometrin matkalta tien 77 tieosan 1 alusta. TSD-tulokset on esitetty jatkuvin viivoin, PPL puolestaan palkein. Ylim- mässä kuvaajassa on esitetty maatutkakuvasta suunnittain tulkittu päällystepaksuus. Tie- osoitteen kasvusuunnan tulokset on esitetty sinisellä värillä, laskusuunnan puolestaan pu- naisella.

Tuloksista havaitaan eri lämpötiloissa mitattujen suuntien TSD-taipumatulosten välillä jonkinasteinen tasoero, jota lämpötilakorjaus ei ole kyennyt poistamaan. Merkittävim- mäksi ero muodostuu tässäkin vertailussa BCI-arvon kohdalla. BCI:tä pidetään syvempiä kerroksia kuvaavana parametrina kohtalaisen lämpötilariippumattomana, minkä johdosta parametrin arvo lasketaan suoraan lämpötilakorjaamattomista taipumista. Esimerkin ta- pauksessa laskenta kuitenkin tuottaa TSD:llä mitattujen suuntien väliseksi BCI-arvojen erotukseksi keskimäärin 25 yksikköä tieosoitteen lämpimämmässä mitatun kasvusuunnan hyväksi. Tieosan PPL-taipumista määritetty BCI puolestaan vastaa kohtalaisesti TSD:n viileämmässä mitatun laskusuunnan tuloksia.

TSD:n mittaussuuntien välinen tasoero on selkeä myös päällysteen alapinnan venymän arvossa. Tosin tässä vertailussa lämpimämmässä mitatun kasvusuunnan arvot jäävät hie-man laskusuuntaa alhaisemmiksi, eli tilanne on päinvastainen kuin SCI-arvon kohdalla. Ilmiö on kuitenkin täysin mahdollinen, sillä venymän lämpötilakorjaus tehdään Vägverketin kaavalla TPPT-menetelmän sijaan. Nähtävästi Vägverketin menetelmä korjaa standardioloista enemmän poikkeavia tuloksia suhteessa voimakkaammin kuin lähempänä normaalioloja mitattuja tuloksia. Kaikkein suurimmat venymäarvot on luonnollisesti laskettu suurimmat maksimitaipumat tuottaneista PPL-tuloksista (Kuva 57).

Merkittävää on, että tien 77 tutkitulla tieosalla 1 TSD:n venymäkuvaajan muoto mukailee huomattavasti paremmin päällystepaksuutta kuin verrokkimenetelmänä käytetyn PPL:n vastaava. Ilmiö näkyy myös korrelaatiokuvaajista (Kuva 54). Korkeammassa lämpötilassa mitatun suunnan 1 venymän ja päällystepaksuuden riippuvuus on lisäksi vielä suuntaa 2 selkeämpi.

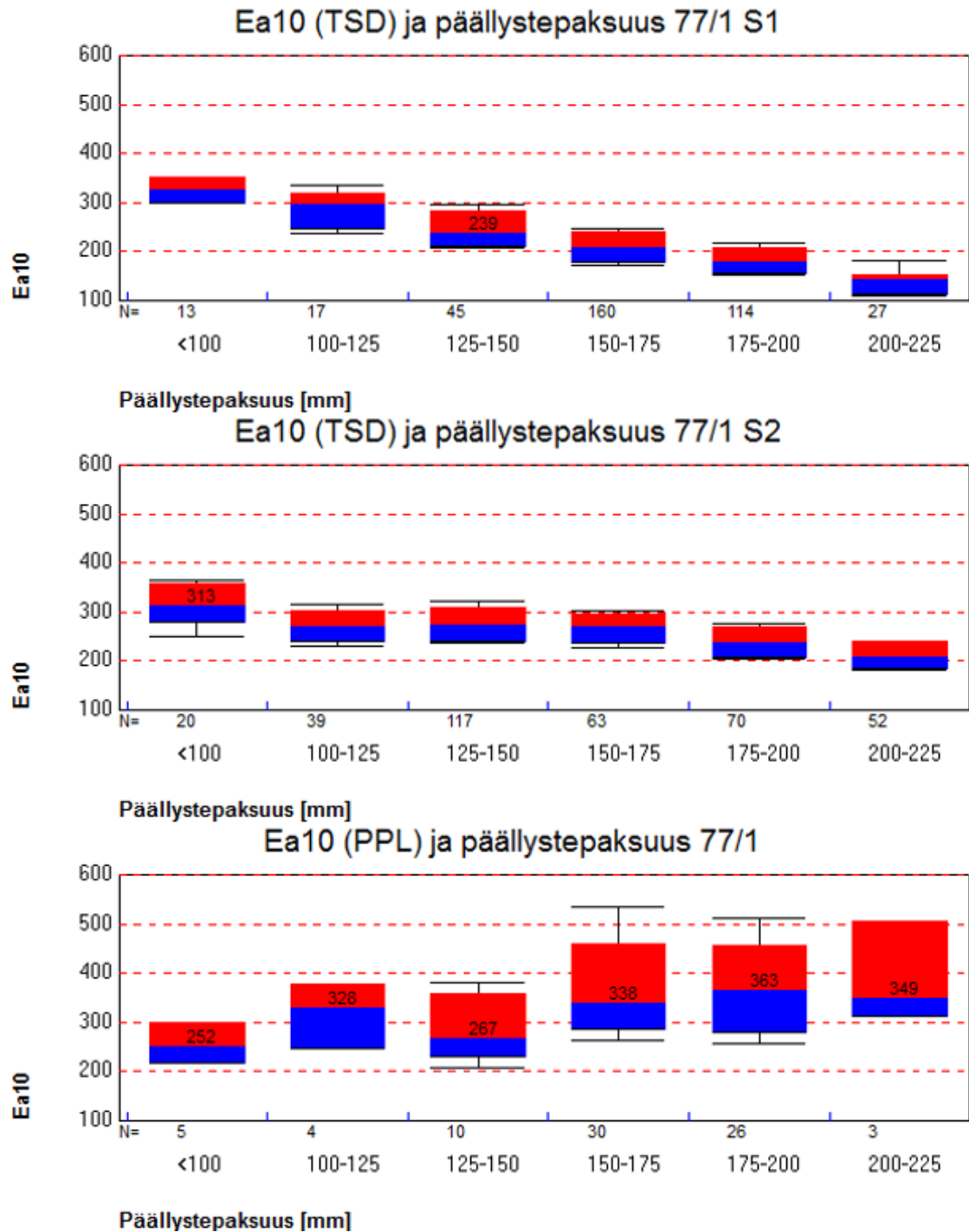


Kuva 53: Kantatien 77 tieosalta 1 suunnittain tulkittu päällystepaksuus sekä jatkuvan että pistekohtaisen taipumamittauksen tuloksista lasketut päällysteen alapinnan venymät, SCI ja BCI Road Doctorin näkymässä. Sininen väri kuvaa suuntaa 1 ja punainen suuntaa 2. PPL-tulokset on esitetty pylväin, kun taas jatkuvat kuvaajat esittävät TSD-taipumista laskettuja tuloksia. Päällystepaksuus on tulkittu maatumakuvista.

Koska tien 77 PPL-tulokset eivät tue lainkaan yleisesti tunnustettua yhteyttä kasvavan päällystepaksuuden ja alhaisemman venymän välillä, jää näin ollen myös TSD- ja PPL-menetelmien tuottamien venymätulosten keskinäinen korrelaatio heikonlaiseksi, kuten liitteen A kuvaajasta nähdään. Tien pituusprofiilista (Kuva 53) havaitaan, että suurimmat erot PPL- ja TSD-tuloksissa sijoittuvat etupäässä pistemäisesti tiettyjen PPL-mittauspisteiden yhteyteen.

Tien 77 rakenteellinen historia saattaa kuitenkin vaikuttaa taipumamittauksen tulosten edustavuuteen, mikä kannattaa pitää mielessä tuloksia tarkasteltaessa. Monin paikoin turpeelle linjattu tie on aikanaan levitetty 4-metrisestä nykyiseen leveyteensä, 6 metriin. Tielle vuonna 2016 sijoitetun Percoaseman rakentamisen yhteydessä selvisi, että levitys on tehty läjittämällä vanhan tien reunaan turpeelle paikoitellen useiden kuutiometrien

suuruisia lohkareita, jotka ovat osittain painuneet turvekerrokseen ja osittain jääneet vaihtelevalla syvyydellä tiepenkereeseen (Saarenketo 2016).



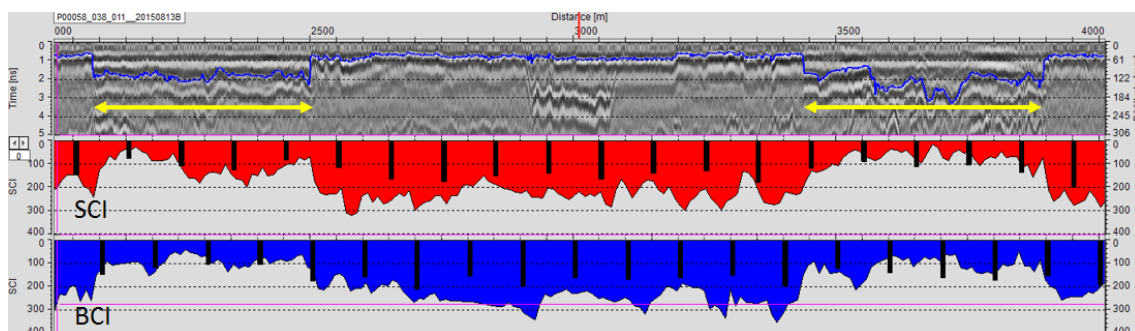
Kuva 54: Päällystepaksuuden ja päällysteen alapinnan venymän yhteys kantatien 77 tieosan 1 taipumamittauksissa. PPL-tulosten nähdään käyttäytyvän täysin tavanomaisesta poikkeavasti.

Esimerkin tieosan vastakkaisten mittaussuuntien TSD-taipumista lasketut SCI-arvot puolestaan ovat melko lähellä toisiaan ja lisäksi vastaavat tutkituista parametreista parhaiten

saman jakson PPL-tuloksia. Myös SCI-arvojen vastaavuus heikkenee jonkin verran päällystepaksuuden kasvaessa. Tässäkin vertailussa viileämmässä mitatut TSD-tulokset korreloivat aavistuksen verran paremmin PPL-tulosten kanssa, mutta lämpimämmässä mitatun suunnan SCI-arvot puolestaan myötäilevät paremmin tien päällystepaksuutta. Teoriassahan paksumpi päällystelaatta johtaa rakenteen pintaosan (ja edelleen koko rakenteen) jäykkyyden kasvuun, minkä pitäisi näkyä paitsi alhaisempana venymänä, niin myös pienempänä SCI-arvona.

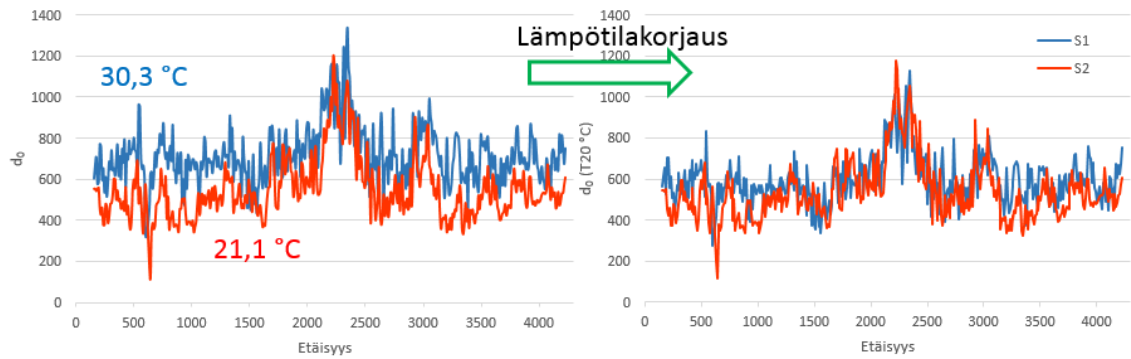
Myös tien 58 tuloksista havaitaan TSD-taipumista lasketun SCI:n ja päällystepaksuuden teorianmukainen yhteys. Tieosalla 38 päällystepaksuus vaihtelee voimakkaasti ja vaikutus TSD-taipumista laskettuihin SCI-arvoihin on selkeä (Kuva 55). Palkeilla esitettyyn PPL-taipumista laskettuun SCI-arvoon päällystepaksuuden muutoksilla on huomattavasti vähäisempi vaikutus.

Esimerkin maatutkakuvasta on keltaisilla nuolilla osoitettu paksumman päällysteen (> 100 mm) osuudet. Muulla näkyvällä osalla päällystepaksuus on noin 50 mm. Punaisella värillä on esitetty suunnan 2 jatkuvan mittauksen SCI-arvo. Sininen väri kuvaa suunnan 1 vastaavia tuloksia. Mustilla pylväillä on esitetty kummankin ajosuunnan PPL-arvot. Paksun päällysteen osuuksilla TSD- ja PPL-tulokset ovat melko yhteneviä, mutta taipuisammilla osuuksilla menetelmien erot kasvavat. Näin huomataan, että mittauslämpötilan lisäksi päällystepaksuus on ratkaiseva TSD- ja PPL-menetelmien korrelaation kannalta.



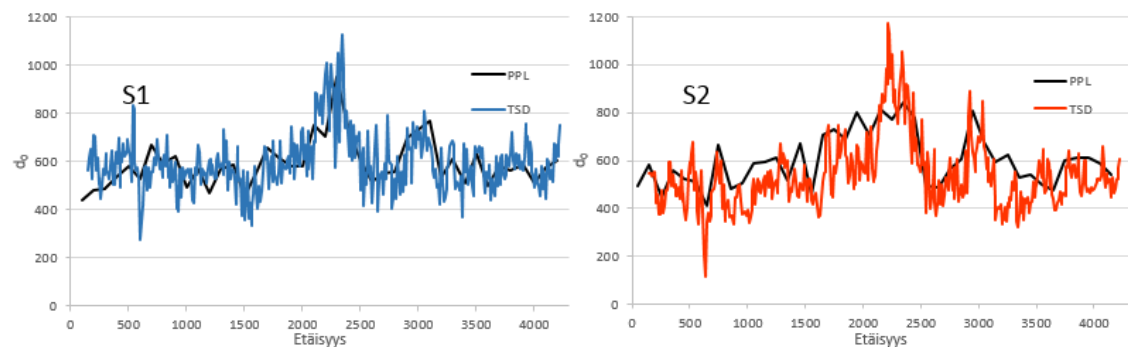
Kuva 55: Päällystepaksuuden vaikutus SCI-arvoon kantatien 58 tieosalla 38.

Palataan tien 77 esimerkkitieosalle 1 ja tarkastellaan lähemmin lämpötilakorjauksen vaikutusta taipumiin ja niiden keskinäisiin suhteisiin. TSD:llä mitattu maksimitaipuma on ennen lämpötilakorjausta luonnollisesti suurempi suunnassa 1 kuin lähempänä standardilämpötilaa mitatussa suunnassa 2 (Kuva 56). TPPT-menetelmäkuvauksen mukainen lämpötilakorjaus kuitenkin tuo arvot kohtalaisella tarkkuudella samalle tasolle. Maksimitaipuman keskimääräinen erotus suuntien välillä on lämpötilakorjauksen jälkeen vain 59 μm (PPL-mittauksessa 12 μm).



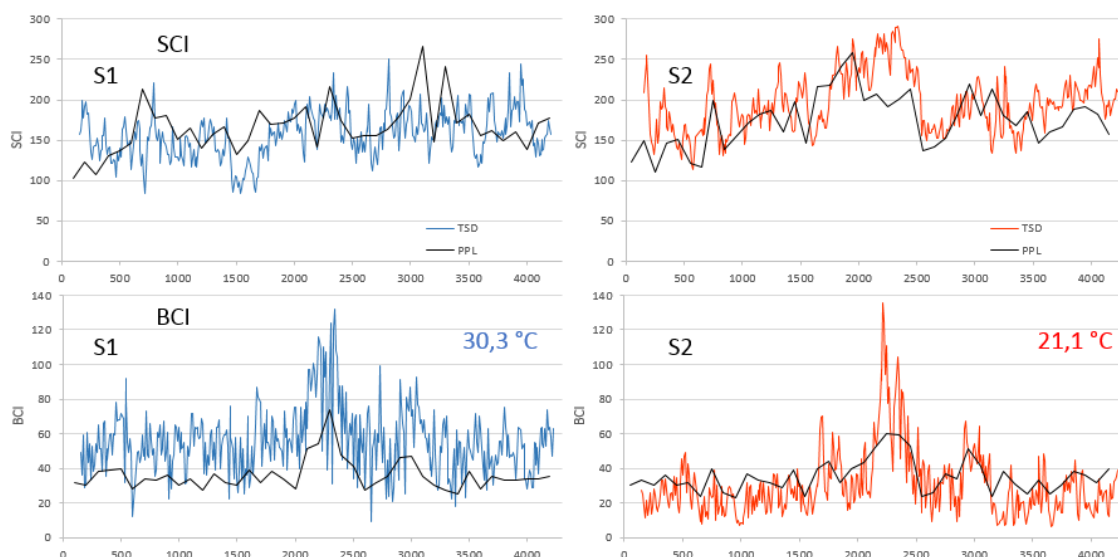
Kuva 56: TPPT-menetelmän mukaisen lämpötilakorjauksen vaikutus maksimitaipumaan kantatien 77 tieosalla 1.

Tarkasteltaessa saman tieosan lämpötilakorjattuja TSD- ja PPL-maksimitaipumia (Kuva 57), havaitaan hieman yllättäen tieosoitteen kasvusuunnan tulosten olevan lähempänä toisiaan kuin laskusuunnan, jossa alkuperäinen lämpötilaero TSD- ja PPL-mittausten välillä on pienempi. Vertailuun on hieman keinotekoisesti eroteltu PPL:n kasvu- ja laskusuunnan kaistoilta mitaamat tulokset erikseen, mikä edelleen kasvattaa menetelmän pisteväliä.



Kuva 57: TSD- ja PPL-maksimitaipuman suuruus suunnittain lämpötilakorjauksen jälkeen kantatien 77 tieosalla 1.

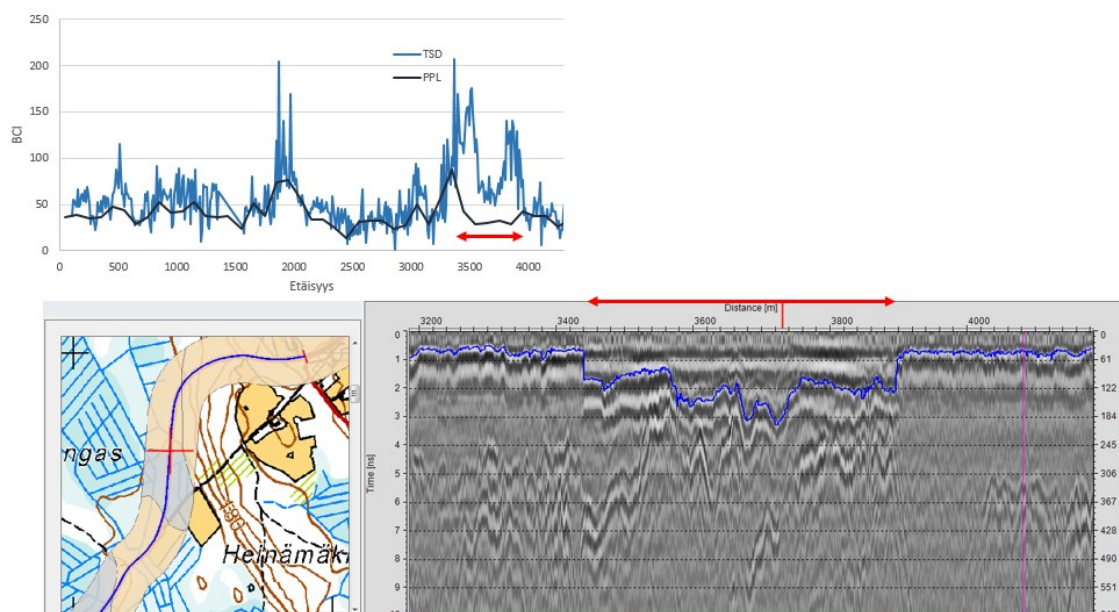
Sama PPL- ja TSD-taipumien keskinäisen suuruussuhteen muutos, jonka Virtala havaitsi SCI- ja BCI-profiileja verratessaan, on nähtävissä myös tien 77 tuloksissa. Muutos ei tosin ole samalla lailla yksiselitteinen ja kasvata eroa PPL:n hyväksi, kuten Destian mittauksissa. Kuva 58 osoittaa, että vastakkaisissa mittaussuunnissa ero jatkuvan ja piste-mäisen mittauksen tulosten välillä kehittyi eri suuntiin.



Kuva 58: TSD sekä PPL SCI ja BCI suunnittain kantatien 77 tieosan 1 PEHKO-mittauksissa. SCI-arvot ovat lämpötilakorjattuja.

Etenkin Keski-Suomen PEHKO-aineiston analyysi antaa ristiriitaisen kuvan jatkuvan ja pistekohtaisen taipumamittausmenetelmän korrelaatiosta sekä lämpötilakorjausmenettelyn toimivuudesta: toisaalta rakenteen kokonaistaipuman kohdalla tulosten vastaavuus näyttäisi kantatien 77 kaltaisella paksupäällysteisellä tiellä olevan sitä parempi, mitä suurempi lähtötilanteen mittauslämpötilojen ero on. Syvempien kerrosten taipumien kohdalla taas TSD:n ja PPL:n rekisteröimä taipumamuoto alkaa poiketa toisistaan, mikä heijastuu SCI-indeksiin ja etenkin lämpötilakorjaamattomana laskettavaan BCI-arvoon.

Korkean lämpötilan ohella päällystepaksuuden merkitystä mittausmenetelmien korrelaation syvyysuuntaisen vääristymän kannalta havainnollistaa hyvin tien 58 esimerkki (Kuva 59). Tieosan 38 kummankin suunnan mittaukset on tehty tasaisessa, noin 30 °C lämpötilassa (Taulukko 7). Päällystepaksuus tieosalla on valtaosin noin 50 mm, mutta muutamissa kohdin paikallisesti paksumpi, kuten kuvan punaisilla nuolilla merkityllä paaluvälillä 3400 – 3900, jolla profiilit eroavat selkeästi toisistaan. Myös muihin jaksoihin, joilla päällystepaksuus on yli 100 mm, liittyy järjestelmällisesti TSD:n ja PPL:n BCI-profiilien anomaliaita. Nämä osuudet ovat paaluväleillä 200 – 700 sekä 2100 – 2500. Nähdään kuitenkin, että yksin suuren päällystepaksuuden ja korkean mittauslämpötilan vaikutus ei vielä selitä kaikkia eroja BCI-profiilien välillä. Lisäksi päällystepaksuuden vaihtelun vaikutus on joissakin kohdissa voimakkaampi kuin toisaalla.



Kuva 59: Päällystepaksuuden paikallinen vaikutus TSD:n ja PPL:n BCI-profiilien eroon kantatien 58 tieosalla 38 ajosuunnassa 1.

Esimerkin tieosa 38 on linjattu hyvin vaihteleville pohjamaille. Päällystepaksuutta, BCI-profiilia ja pohjamaakarttaa vertailemalla voidaan tehdä seuraavat havainnot: ohut päällystepaksuus kantavalla pohjamaalla tuottaa samansuuruisia BCI-tuloksia kummallakin menetelmällä. Pehmeällä maapohjalla pistemäisen mittauksen BCI-tulokset ovat esimerkin tieosan mittausolosuhteissa lähtökohtaisesti jatkuvan mittauksen tuottamia arvoja alhaisempia. Ero on havaittavissa jo hienolla hiedalla, mutta kertaantuu pohjamaan laadun edelleen heiketessä. Turpeella PPL:n tuottama BCI on vain noin kolmasosan jatkuvan mittauksen BCI-arvosta.

Ainakin esimerkin kaltaisissa erittäin lämpimissä mittausolosuhteissa päällystepaksuuden kasvu näyttäisi edelleen kasvattavan TSD:n BCI-arvoja verrattuna viileässä tehtyyn PPL-mittaukseen. Eroa kasvattava vaikutus on sitä voimakkaampi, mitä pehmeämmällä maapohjalla ollaan. Moreenisella maapohjalla paaluvälillä 2100 – 2500 nähdään 50 mm päällystepaksuuden kasvun vaikutuksen BCI-arvoon olevan noin 10 yksikköä. Turpeella paalulla 3500 vastaava vaikutus on moninkertainen. Lisäksi TSD-taipumamittauksen yksittäiset piikit heijastuvat myös BCI-arvon laskentaan aiheuttaen profiiliin erittäin korkeita huippuja, jotka PPL:n harvempi pisteväli kätkee. Eri asia on arvioida, kuinka totuudenmukaisia TSD-taipumista lasketut yli 200 yksikön pistemäiset BCI-arvot ovat.

Yhteenveto TSD- ja PPL-tulosten korrelaatiosta

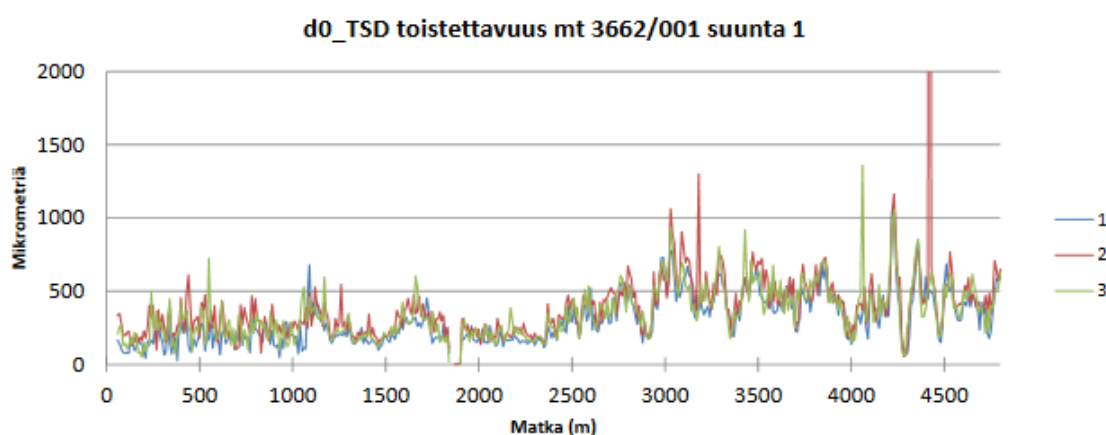
Kaiken kaikkiaan menetelmien heikohko korrelaatio voi selittyä päällystepaksuuden ja huomattavasti toisistaan poikkeavien mittauslämpötilojen yhdistelmä, jota lisäksi ainakin kaukotaipumien osalta vaihtelevat pohjasuhteet vahvistavat. Tutkimusaineiston suppeuden vuoksi on hankala aukottomasti erotella päällystepaksuuden itsenäistä vaikutusta,

koska kaikki paksupäällysteiset tiet (KES) oli mitattu pitkälti samankaltaisissa olosuhteissa. Päällystepaksuuden vaikutus näyttäisi heijastuvan myös pohjamaan ja alusrakenteen deformatumisriskiä kuvaavan BCI-arvon määrytymiseen.

Sitä vastoin vertailukelpoisissa olosuhteissa (Lapin PEHKO-kohteet) tehdyissä mittauksissa TSD- ja PPL-menetelmien tulokset ovat hyvin yhteneviä. Lapin kohteiden joukkoon on valikoitu kattavasti monen tyyppisiä rakenteita ja vaihtelevia pohjasuhteita, eikä näistä aiheudu merkittäviä eroja eri menetelmien tuottamien taipumatulosten välille. Myös aiemmassa suomalaisessa jatkuvan ja pistemäisen taipumamittauksen vertailussa (Virtala 2016) on päädytty lopputulokseen, että tietyllä tasoterolla menetelmät tuottavat hyvin samansuuntaisia taipumatuloksia, joskin PPL:n harvempi mittaussäli kätkee osan vaihte-
lusta.

Mikäli voimakkaasti vaihtelevien mittauslämpötilojen ja muiden ulkoisten tekijöiden vaikutus TSD-mittausten tuloksiin Suomen oloissa haluttaisiin aukottomasti selvittää, vaadittaisiin laajoja samojen tieosien toistokokeita vaihtelevissa olosuhteissa. Aikaisemman suomalaisen tutkimuksen (Virtala 2016) yhteydessä tehtyjen toistokokeiden perusteella TSD-menetelmän reliabiliteetti on todettu hyväksi, toistokorrelaation ollessa parhaimmillaan 90 % tasolla. Virtalan mukaan toistettavuutta heikensivät etupäässä yksittäiset poikkeamat (Kuva 60), joita esiintyi myös PEHKO-mittausten tuloksissa.

Virtalan tutkimusraportti ei sisällä kuitenkaan tarkempaa tietoa toistokokeiden aikana vallinneista olosuhteista, joten on mahdotonta arvioida, kuinka suuri osa eri mittauskerroilla saatujen tulosten eroista selittyy olosuhteilla, esimerkiksi poikkeavilla mittauslämpötiloilla, ja paljonko on muuta satunnaisvaihtelua, jota saattaa aiheuttaa esimerkiksi käytetty ajolinja. Selvää on kuitenkin, että kokeissa havaitut pistemäiset poikkeavuudet eivät voi selittyä päällysteen lämpötilalla. Mittaushetkisen lämpötilan vaikutuksen täytyisi näkyä pääosin laaja-alaisempina tulosten tasoeroina.



Kuva 60: TSD-mittauksen toistettavuus, maksimitaipuma kolmella mittauskerralla (Virtala 2016, s. 44).

6.2.4 Johtopäätöksiä vertailtujen menetelmien korrelaatiosta

TSD:n käytettävyyks perustuu pitkälti siihen, että sen tuottama tieto tierakenteen mekaanisesta kuormitusvasteesta on useissa maissa kerätyn käyttökokemuksen perusteella vertailukelpoista vakiintuneella pudotuspainolaitteella mitatun taipumatiedon kanssa. Liitteen A kuvaajat antavat kuitenkin jossakin määrin ristiriitaisen kuvan TSD:n ja perinteisen pudotuspainolaitteen tuottaman taipumatiedon vastaavuudesta Suomen tiestöllä: siinä missä Lapissa saadut tulokset näyttäisivät korreloivan melko hyvin ja tukevan yleistä käsitystä menetelmien vertailukelpoisuudesta, näyttäytyy menetelmien keskinäinen riippuvuus Keski-Suomen mittausaineiston perusteella osittain jopa sattumanvaraisena.

Kansainvälisesti menetelmien vastaavuutta on tutkittu runsaasti, mutta vertailua myös Suomen tiestöllä motivoivat maamme tiestön erityispiirteet; pakkaskestävyysvaatimusten vuoksi käytetyt pehmeillä bitumilaaduilla sidotut päällysteet sekä yleisesti ottaen ohuet rakennekerrokset. Näiden yhteisvaikutuksena tierakenteiden taipumat ovat Suomessa suuria verrattuna esimerkiksi Keski-Euroopan taipumatasoon. Lämpimämmissä maissa käytettävien kovien bitumilaatujen johdosta päällysteen moduuliarvot nousevat moninkertaisiksi suomalaisiin päällysteisiin verrattuna. Kun lisäksi päällystekerrokset ovat tyyppillisesti paksumpia, ovat tierakenteet huomattavasti jäykempiä kuin Suomessa.

Kappaleen 6.2.3 havaintojen perusteella päällystepaksuuden vaikutus näyttäisi suomalaisella tiestöllä heijastuvan kaikkien vertailtujen kuntoparametrien arvoihin. Erittäin voimakkaana vaikutus näkyy TSD-tuloksissa. Suomalaiset ohuet päällysteet eivät kuitenkaan näyttäisi tuottavan ongelmia menetelmien korrelaatiolle, vaan suomalaisella tiestöllä anomaliat liittyvät erityisesti paksuihin päällysteisiin. Ohuiden päällystepaksuuksien vaikutus TSD/PPL-korrelaatioon näyttäisi rajoittuvan TSD:n rekisteröimiin yksittäisiin piikkeihin, joita aineiston analyysin perusteella esiintyy erityisesti alle 50 mm päällystepaksuuksilla. Ne saattavat liittyä esimerkiksi päällysteen halkeamiin, joiden kohdalla mitaus synnyttää suuria pistemäisiä kuormitushuippuja. Piikit voivat olla myös TSD-aineistoon keskiarvomenettelystä huolimatta jäävää kohinaa, jolle ei rakenteessa ole selittävää tekijää.

Paksupäällysteisten suomalaisten teiden (KES PEHKO-kohteet) taipumatulosten analyysi antaa jossakin määrin ristiriitaisen kuvan jatkuvan ja pistekohtaisen taipumamittausmenetelmän korrelaatiosta: rakenteen kokonaistaipuman osalta tulosten vastaavuus on kohtalainen. Syvempien kerrosten taipumien kohdalla taas TSD:n ja PPL:n rekisteröimä taipumamuoto alkaa poiketa toisistaan, mikä heijastuu SCI-indeksiin ja etenkin lämpötilakorjaamattomana laskettavaan BCI-arvoon, joka korkeammassa lämpötilassa mitattuna saa jopa epärealistisen suuria arvoja.

Havainnot paksupäällysteisiltä teiltä pohjautuvat kuitenkin ainoastaan Keski-Suomessa mitattuun aineistoon, jolle on leimallista toisaalta erittäin korkea TSD-mittauslämpötila, ja toisaalta suuri lämpötilaero vertailtavien menetelmien välillä. Lapin tutkimusalueella mittausolosuhteet ovat olleet menetelmien vertailtavuuden kannalta suotuisimmat, mutta päällystepaksuuden vaihtelu on vähäisempää ja päällysteet ovat keskimäärin melko

ohuita. Näin ollen päällystepaksuuden itsenäisestä vaikutuksesta menetelmien korrelaatioon on näin rajallisen aineiston pohjalta vaikea tehdä päätelmiä. Sen sijaan on ilmiselvää, että erityinen tulosten korrelaatiota heikentävien anomalioiden lähde on paksun päällysteen ja korkean mittauslämpötilan yhteisvaikutus, mikä on erittäin selkeä indikaattori lämpötilakorjauksen toimimattomuudesta. Väitettä tukee myös se, että korkea TSD-mittauslämpötila ei aiheuta lainkaan vastaavansuuruista tulosten vääristymää ohuilla päällysteillä, joilla sidotun kerroksen vaikutus koko rakennetta jäykistävänä elementtinä on vain vähäinen ja rakenteen jäykkyys on pääosin peräisin sitomattomien kerrosten ominaisuuksista.

Lämpötilakorjauksen tärkeys selittyy sillä, että Suomessa käytetyille pehmeille bitumeille ja edelleen niillä sidotuille päällysteille on ominaista niiden jäykkyysominaisuuksien voimakas lämpötilariippuvuus. Ulkomailla käytetyt kovat bitumilaadut poikkeavat ominaisuuksiltaan näistä siten, että niillä vastaava riippuvuus on tavanomaisella lämpötilan vaihtelualueella käytännössä olematon. Tällöin lämpötilakorjauksen vaikutus tuloksiin jää vähäiseksi ja korjausmenetelmän toimivuus ei tule samalla tavoin testattua kuin Keski-Suomen PEHKO-mittauksissa.

Huomionarvoista on kuitenkin, että lämpötilakorjauksen puutteet aiheuttavat lähinnä tulosten tasoeroa. Rakenteellisesti vahvemmat ja heikommat tiejaksot erottuvat mittauslämpötilasta riippumatta, koska mitattavan jakson sisällä päällysteen sisälämpötilan vaihtelu on melko vähäistä ja virhe tällöin kaikkialla suunnilleen samansuuruinen. Pääosin erittäin korkeissa lämpötiloissa mitatuissa Keski-Suomen TSD-tuloksissa näkyy selkeästi päällysteen venymän ja SCI-arvon teorianmukainen riippuvuus päällystepaksuudesta.

Ehkä selkeimmin Keski-Suomen TSD/PPL-korrelaatiota heikentää se, että tien 77 viileämmässä mitatuissa PPL-tuloksissa vastaavaa teorianmukaista yhteyttä päällystepaksuuden ja venymä- sekä SCI-arvojen välillä ei jostakin syystä ole havaittavissa, vaan näiden yhteys on lähes sattumanvarainen. Näin ollen suppealla tutkimusaineistolla yhden ongelmallisen kohteen vaikutus menetelmien vertailulle koko tutkimusalueella on voimakas ja etenkin venymän osalta TSD/PPL-korrelaatio näyttääkin Keski-Suomessa olemattomalta (Liite A).

Puhtaasti TSD- ja PPL-menetelmien korrelaation kannalta PEHKO-mittausten aineisto on auttamatta liian suppea, jotta sen perusteella voitaisiin luotettavasti arvioida menetelmien tuottamien tulosten korrelaatiota suuremmassa mittakaavassa. Mittausolosuhteiden kaan puolesta tulokset ovat vertailun kannalta edustavia ainoastaan Lapin tutkimusalueella. Siellä myös saadut tulokset ovat erittäin rohkaisevia.

Keski-Suomen vertailun ongelma on, että kummallakin menetelmällä tuotettuja tuloksia on korjattava voimakkaasti taipumien normalisoimiseksi ja vieläpä vastakkaisiin suuntiin. Lisäksi Keski-Suomessa PPL-kohteet ovat valikoituneet vertailuun lähinnä laadunvarmistuksellisista syistä, eivätkä niinkään tyyppiesimerkkeinä erilaisista rakenteista. Keski-Suomen tuloksia tarkasteltaessa onkin syytä antaa enemmän painoarvoa TSD-tu-

lostien ja rakennepaksuuksien sekä rakenteissa todettujen vaurioiden yhteydelle kuin tulosten PPL-korrelaatiolle, koska kuten tien 77 esimerkki osoittaa, näyttäisi suurimmat ongelmat liittyvän mieluummin PPL- kuin TSD-tuloksiin.

Tässä vertailussa saatujen tulosten arvo piileekin etupäässä siinä, että sattumalta näin keskenään erilaisissa olosuhteissa tehtyjen mittausten keskinäinen vertailu paljastaa olosuhteiden huomattavan vaikutuksen tierakenteiden taipumatuloksiin ja nykyisen lämpötilakorjauskäytännön riittämättömyyden etenkin paksuilla päällysteillä ja syvempiä kerroksia kuvaavien taipumien kohdalla. Havaintojen ansiosta ääriämpötiloissa mitattuun taipumatietoon osataan vastaisuudessa suhtautua kriittisesti. Myös normalisointimenetelmiin voidaan jatkossa etsiä parannusta.

Lisäksi on kyseenalaista, kuinka voimakkaasti Suomessa käytettyjen verraten pehmeiden päällystelaatujen jäykkyysominaisuudet alkavat muuttua esimerkiksi +25 °C ylittävissä lämpötiloissa. Vaarana on, että päällysteen vaste alkaa muuttua elastisesta viskoplastiseksi, jolloin kaikkien tavanomaisten lämpötilakorjauskaavojen rajat alkavat tulla vastaan yritettäessä pakottaa mitattuja taipumia vastaamaan muodonmuutoksia standardiolosuhteissa.

7. TIETOAINEISTOJEN INTEGROITU ANALYYSI

7.1 Kosteuden näkyminen TSD-tuloksissa

Tierakenteen kuormitusvaste on teorian mukaisesti riippuvainen muiden tekijöiden ohella rakenteen kosteustilasta. Rakenteeseen tunkeutuva kosteus alentaa rakennekerrosten jäykkyyttä ja kasvattaa riskiä pysyvien muodonmuutosten syntymiselle. Tässä kappaleessa pyritään selvittämään, näkyykö rakenteen kosteustilan vaikutus TSD-tuloksissa.

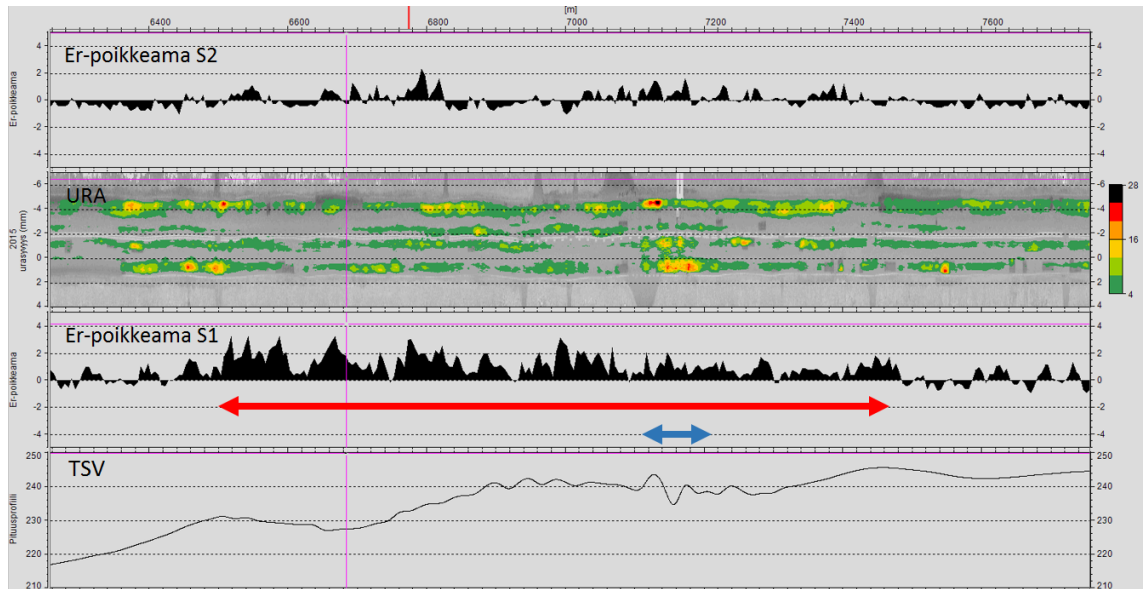
Tarkasteluun on pyritty valitsemaan kohteita, jotka vuoden 2016 PEHKO-projektin Keski-Suomen kevätmittausten perusteella varmuudella kärsivät kuivatuspuutteista. Näillä perusteilla mukaan valittiin kantatieltä 77 tieosa 3, seututieltä 633 tieosa 3 ja seututieltä 648 tieosa 2. Kuten kappaleessa 4.1 mainittiin, on Keski-Suomen PEHKO-mittaukset tehty heinäkuussa erittäin helteisissä olosuhteissa, jolloin oletettavaa on, että kaikki mahdollinen ojissa seisova vesi on haihtunut. Tällöin kohdat, joissa vesi seisoo ja pääsee tunkeutumaan rakenteeseen eivät ole suoraan nähtävissä esimerkiksi TSD-ajoneuvon ottamista valokuvista. Näin ollen kuivatuspuutteista kärsivät jaksot on pyrittävä paikantamaan aineistosta epäsuorasti hyödyntäen muita tiestöltä kesällä 2015 kerättyjä tuloksia.

RDSV-mittauksessa kerätystä maatulka-aineistosta laskettava kantavan kerroksen dielektrisyys (ϵ_r -arvo) kuvaa päällysrakenteen yläosassa olevan vapaan veden määrää ja kantavan kerroksen kiviaineksen kosteustilaherkkyyttä. Arvoa ei pidä sekoittaa päällysteen pinnasta mitattuun dielektrisyyteen, jonka perusteella voidaan puolestaan jäljittää esimerkiksi päällysteen halkeamia tai tyhjättilaa.

PEHKO-kohteiden maatulkausta ei ole tehty aivan yhdenaikaisesti taipumamittausten kanssa, joten täsmälleen taipumamittausten aikana vallinnutta kosteustilaa ei pystytä selvittämään. Ajatuksena onkin määrittää tarkasteluun valikoiduille tieosille dielektrisyiden keskiarvo, johon vertaamalla pyritään löytämään tieosalta jaksot, joilla dielektrisyys on koholla. Näissä kohdissa tierakenteen katsotaan mittausajankohdasta riippumatta kärsivän kosteudesta muuta tarkasteltavaa jaksoa enemmän.

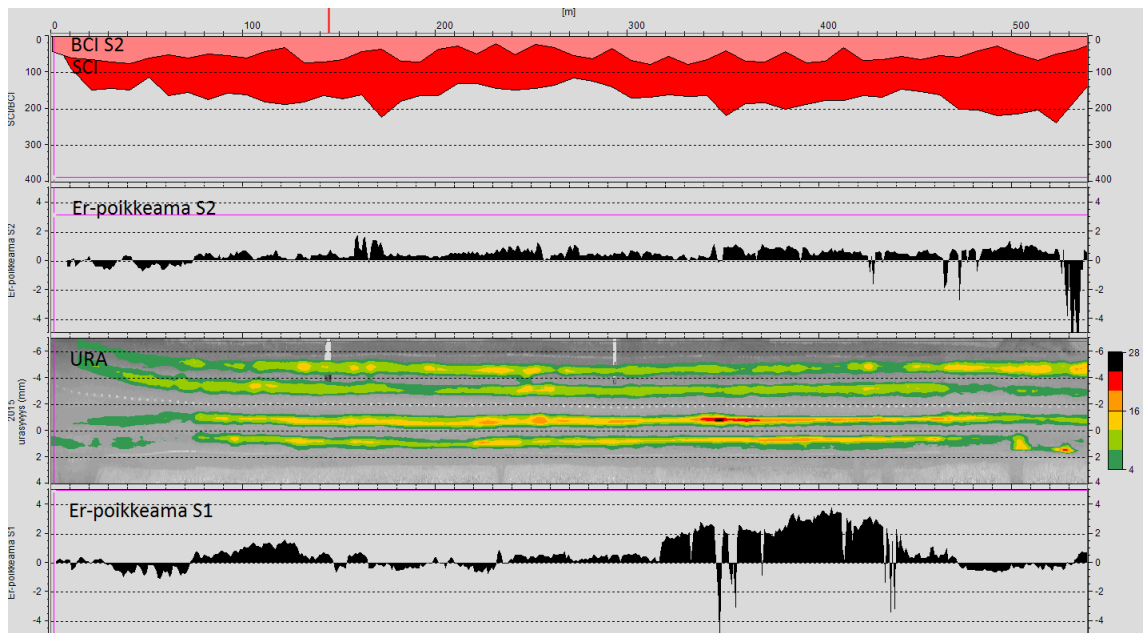
Edellä kuvatun menetelmän toimivuutta on pyritty osoittamaan esimerkiksi seututieltä 633 (Kuva 61). Punaisella nuolella osoitetulla lähes kilometrin jaksolla on pari pituussuuntaista notkelmaa. Lisäksi tie kulkee sivukaltevassa maastossa siten, että suunnassa 1 maasto viettää tielle päin. Pituus- ja poikkiprofiilien yhteisvaikutus veden kerääntymiseen kasvusuunnan puoleiseen sivuojaan, tunkeutumiseen rakenteen alle ja edelleen kapillaariseen nousuun aina kantavaan kerrokseen asti nähdään suunnan 1 kohonneena ϵ_r -arvona. Positiivinen ϵ_r -poikkeama tarkoittaa keskimääräistä suurempaa dielektrisyysarvoa, eli kohonnuttua vapaan veden määrää. Noin paaluvälillä 7100 – 7200 (sininen nuoli) nähdään

myös voimakasta urautumista, joka on seurausta muodonmuutoksille altistavan puutteellisen kuivatuksen ja pienipiirteisestä pystygeometriasta seuraavien dynaamisten kuormitushuippujen yhteisvaikutuksesta.



Kuva 61: Esimerkki kosteutta keräävistä notkelmista (punainen nuoli) seututien 633 tieosalla 3. Tien pituusprofili on esitetty alimmassa ikkunassa. Sininen nuoli osoittaa pistemäisen vaurion sijoittumista tien pystytasaukseen nähden.

Tielle 648 (Kuva 62) dielektrisyysarvot on laskettu metrin keskiarvoina. Tiellä 633 (Kuva 61, Kuva 63) on puolestaan käytetty 5 metrin keskiarvoa, jolloin arvojen hajonta Er-kuvaajassa on hieman maltillisempaa. Vertailuun on otettu kantavan kerroksen deformausriskiä kuvaavan SCI-arvon lisäksi myös BCI, jotta nähdään mahdollinen alusrakenteen tai pohjamaan vaikutus urautumiseen.

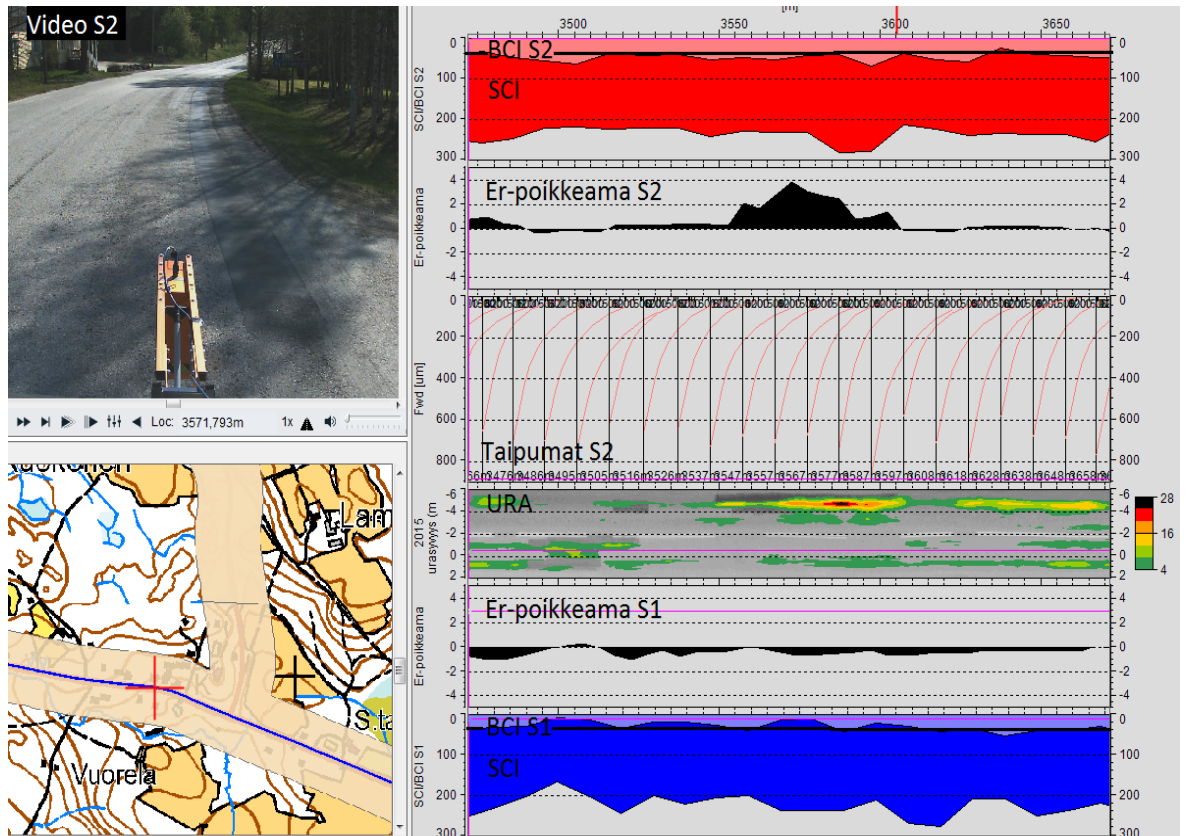


Kuva 62: Road Doctorin näkymä seututien 648 tieosalta 2.

Tien 648 dielektrisyysarvojen perusteella ei kantavan kerroksen kosteustilassa ole juuri-kaan vaihtelua: keskimääräinen Er-arvo tieosalle suunnassa 1 on vain 5,6 ja vastakkaisessa suunnassa ainoastaan 5,0. TSD-mittaus tiellä on tehty pelkästään suunnassa 2. Tässä suunnassa dielektrisyiden positiivinen poikkeama jää kauttaaltaan erittäin alhaiseksi (Kuva 62). Näin alhaiset dielektrisyysarvot osoittavat kantavan murskeen olevan hyvä-laatuista, sillä kosteustilaherkän kiviaineksen Er-arvo on kuivaankin aikaan mitattaessa vähintään tasolla 8-9. Tilanne on sama myös kantatien 77 tutkitulla tieosalla 3. Näin ollen näiden kohteiden tulokset eivät anna viitteitä kosteuden vaikutuksesta mitattuihin taipumiin.

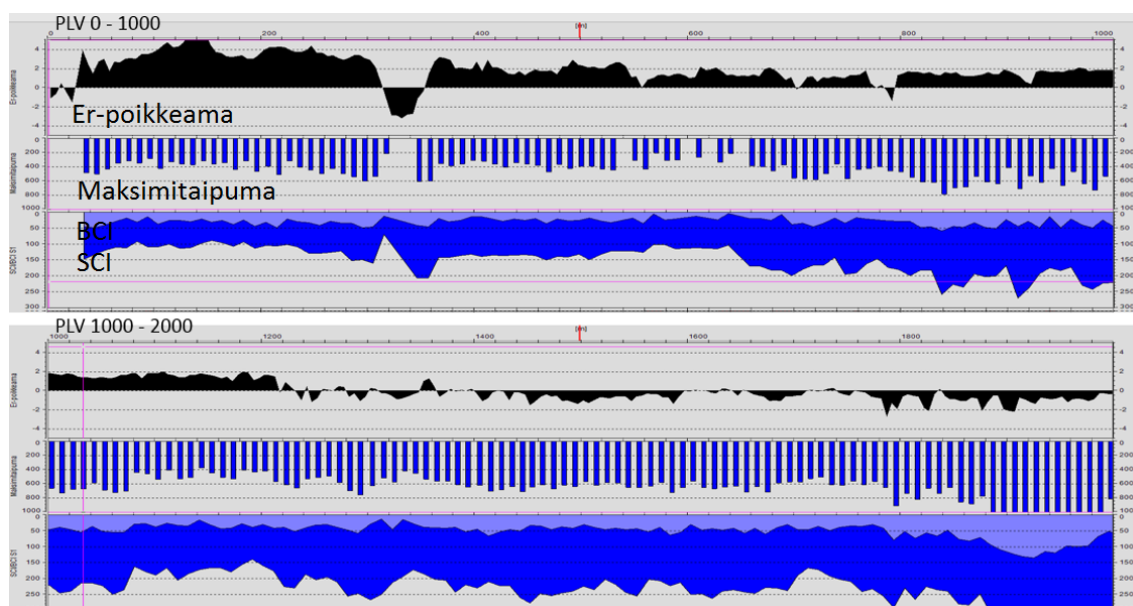
Tien 633 tarkastellulla tieosalla dielektrisyiden keskiarvot ovat puolestaan aavistuksen korkeammat, tieosoitteen kasvusuunnassa 6,5 ja laskusuunnassa 6,2. Tälläkin kohteella suurin positiivinen poikkeama jää alle 4 yksikköön ja yli 3 se on vain muutamissa yksittäisissä pisteissä. Roadscanners Oy:n analyyseissä pidetään tyypin 1 urautumisen kannalta kriittisenä kantavan kerroksen dielektrisyysrajana Er-arvoa 9, joten tälläkin tiellä kriittinen raja saavutetaan vain yksittäisissä kohdissa.

Säännönmukaista yhteyttä kohonneen kosteuden ja muuta tieosaa huonompien SCI- ja BCI-arvojen välillä ei ole havaittavissa myöskään tiellä 633, tai se hukkuu muiden tekijöiden alle. Vaikka tässä käsitelty rakenteen yläosan Er-arvo ei suoranaisesti liitykään BCI:n kuvaamaan kerrokseen, on silti oletettavaa, että kohdissa, joissa vesi on kapillaarisesti noussut rakenteen pintaan, myös alusrakenne ja pohjamaa kärsivät kosteuden aiheuttamasta pehmenemisestä. Paikallisesti sentään nähdään paaluvälillä 3550 – 3600 suunnassa 2 noin 50 metrin matkalla kohonnutta kosteutta, johon liittyy tien reunan voimakas painuma, suurehko pistemäinen maksimitaipuma ja kohonneet SCI- ja BCI-arvot (Kuva 63).



Kuva 63: Pistemäinen kosteuteen liittyvä vaurio seututien 633 tieosalla 3. BCI-kuvaajien musta vaakaviiva osoittaa 40 rajan, jota suuremmilla arvoilla ongelmia tyypillisesti alkaa esiintyä.

Lapin alueella mitattu Er-arvon hajonta on hieman suurempaa, kuten tien 924 esimerkki osoittaa (Kuva 64). Esimerkin tieosalla keskimääräinen kantavan kerroksen dielektrisyysarvo on 6,2 ja positiivinen poikkeama paikoitellen yli 5 yksikköä. Kuvassa on esitetty tieosan ensimmäiset 2000 metriä ja havaitaan, että maksimitaipumaan ja muihin verrattuihin suureisiin vaihtelua aiheuttavat etupäässä muut kuin kosteustekijät. Esimerkissä siniset palkit kuvaavat maksimitaipuman suuruutta. Alimmissa kuvaajissa on esitetty kasvusuunnan BCI- ja SCI-arvot.



Kuva 64: Kosteustilan poikkeamat, maksimitaipuma sekä SCI- ja BCI-arvot seututien 924 tieosan 1 kasvusuunnan mittauksessa.

Muun muassa Dawson & Kolisoja (2004) ovat todenneet, että korkeassa vesipitoisuudessa ongelmallisesti käyttäytyvät kiviainekset voivat kuivana ja liikenteen uudelleen tiivistämänä toimia moitteettomasti. Niinpä rakenteen mittaushetkinen tila saattaa aina kätkeä joitakin tästä poikkeavissa olosuhteissa esiintyviä ominaisuuksia. Tämä pätee luonnollisesti myös taipumamittausten tuloksiin. Lisäksi vaikka korkea dielektrisyys merkitsee aina kosteudelle sensitiivistä materiaalia, eivät kaikki kosteuden aiheuttamat ongelmat kuitenkaan heijastu materiaalin dielektrisyiden arvoon. Näin ollen tämän kuivaan aikaan tehdyn vertailun havainnot eivät ole yleispäteviä kuvaamaan kosteuden näkymistä TSD-taipumissa kaikissa mittausolosuhteissa.

7.2 Teräsverkot

Rakenteeseen asennettavilla teräsverkoilla tai muilla vahvisteilla pyritään muun muassa estämään epätasaisen routanousun aiheuttamia halkeamia, heijastushalkeilua tai tien levennykseen liittyvän pituushalkeaman syntymistä (Kanerva-Lehto 2009, s. 14 – 19, 26; Korkiala-Tanttu et al. 2003). Pyrkimyksenä voi olla myös urautumisen vähentäminen, soratien vahvistaminen tai tien latistumisen ja levenemisen estäminen.

Vahvisteverkkoja voidaan käyttää myös pohjanvahvistusten kuten stabilointien tai paalutuksen yhteydessä rakenteen omasta painosta ja liikennekuormituksesta syntyviä voimia jakamassa. Teräsverkon käyttö perustuu teräksen kykyyn ottaa vastaan roudan nostovoiman tai liikenteen aiheuttamien rakenteen taipumien aikaansaamia vetojännityksiä. Toiminnan edellytyksenä on verkon riittävä ankkuroituminen, jonka takaamiseksi verkon silmäkoon ja kiviaineksen rakeisuuden suhde on oltava oikea ja rakenteen riittävästi tiivistetty (Aalto et al. 1998, Kanerva-Lehto 2009, s. 26 mukaan).

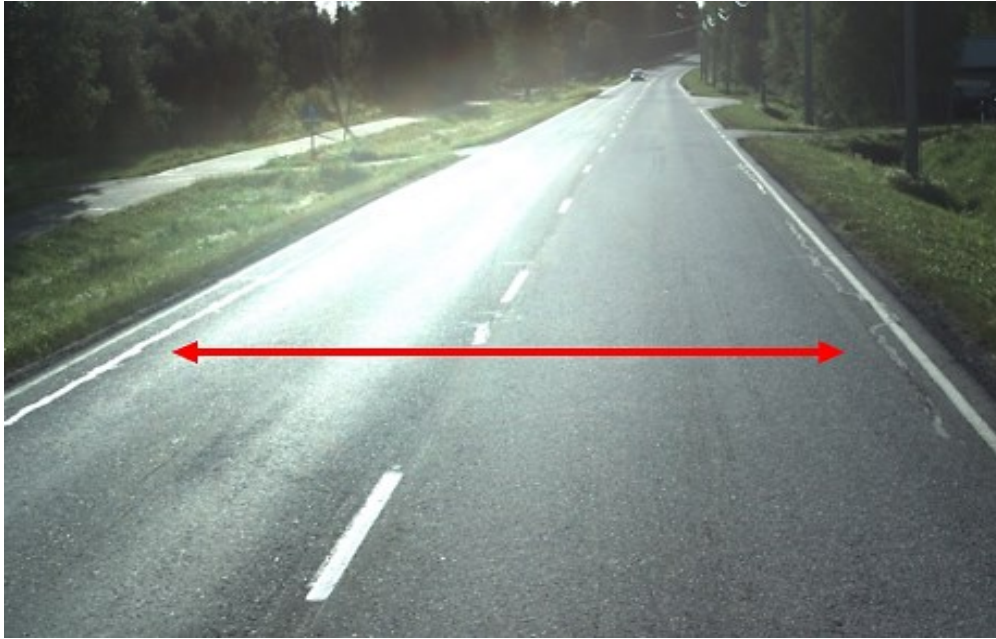
Teräsverkko siirtää poikkisuuntaiset vetojännitykset tierakenteen alta verkon reunalle (Kuva 65). Kuvan esimerkissä pientareelle verkon reunalinjalle on syntynyt huomattava halkeama, mutta päällystelaatta on säilynyt ehjänä. Kyseessä on pehmeikkökohde, jolla pohjamaan kantavuus on alhainen ja routiminen erittäin voimakasta.

Tyypillisesti verkot asennetaan poikittain tien pituussuuntaan nähden. Mitoitusohjeiden mukaan kantavaan kerrokseen asennettaessa teräsverkon pituuden tulee olla vähintään 0,5 – 1 m päällysteen leveyttä suurempi (Höynälä & Mäkelä 2004, Gustafsson et al. 2002, Kanerva-Lehto 2009, s. 38 mukaan). Liian lyhyen teräsverkon vaikutuksesta päällysteen reunaan voi muodostua pituussuuntainen halkeama, joka syntyy verkon ottamien vetojännitysten purkautuessa päällysteen alla (Kuva 66). Tämä nauhamainen vetojännityshuippu ylittää päällysteen vetolujuuden, jolloin päällysteeseen syntyy halkeama.

Teräsverkon asennettavuutta voidaan parantaa katkaisemalla verkko tien keskilinjalta. Tällöin asennus voidaan tehdä kaista kerrallaan, eikä liikennettä tarvitse asennusvaiheessa ohjata verkon päältä. Verkot jatketaan tällöin tien keskilinjalla sinkiläliitoksia. Tämän asennustavan käytöstä saattaa aiheutua tien keskilinjalle routahalkeamia, joten suositeltavampaa on asentaa verkot koko tiepoikkileikkauksen pituisina. (Said et al 2000, Said et al. 2001, Sanberg & Björnfot 2004, Kanerva-Lehto 2009, s. 56 mukaan)



Kuva 65: Tiepenkereen pituussuuntainen halkeama teräsverkon reunassa. Kuva käsi-varren Lapista valtatieltä 21.



Kuva 66: Reunan pituushalkeamia liian kapean teräsverkon kohdalla kantatien 81 tieosalla 2 (TSD-mittausajoneuvon kuva).

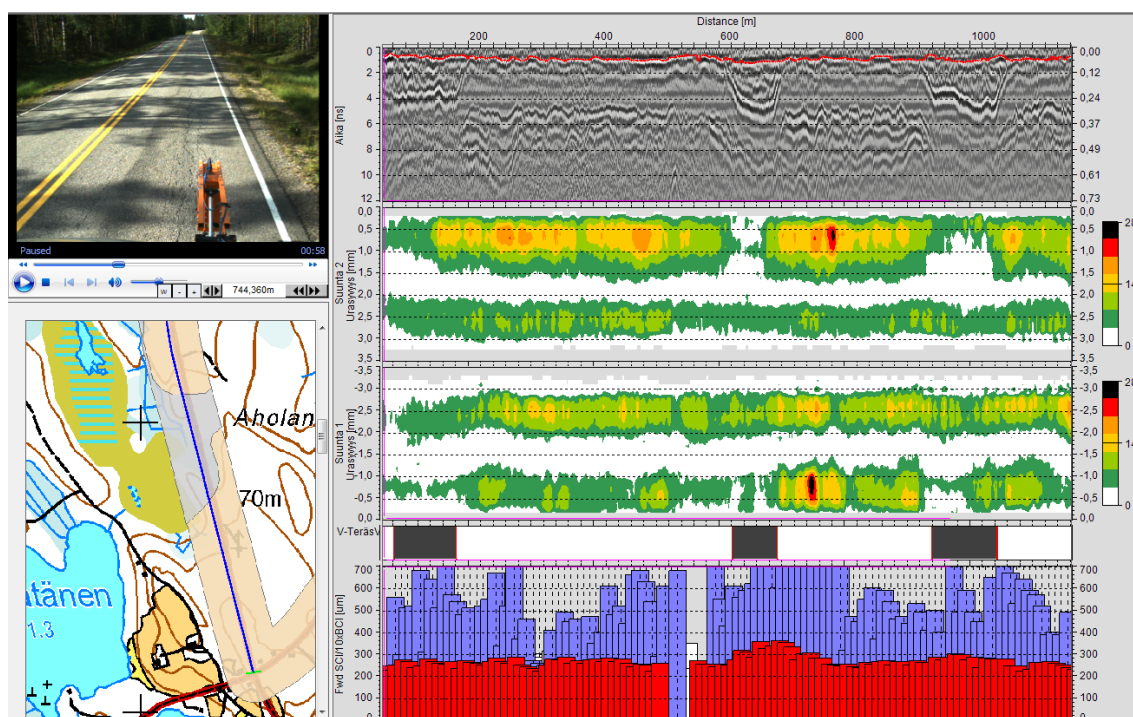
Teräsverkkoja on asennettu Suomessa tierakenteisiin 1970-luvulta lähtien. Käyttö on painottunut etupäässä Pohjois- ja Itä-Suomeen. Tarkoista määristä ja kohteista ei ole varmaa tietoa, koska käytännöt teräsverkotettujen kohteiden kirjaamiseen ovat vaihdelleet alueittain (Kallio 2000, Kanerva-Lehto 2009, s.11 mukaan). Maatutkan avulla teräsverkot kuitenkin havaitaan rakenteesta melko helposti ja luotettavasti.

Teräsverkkojen vaikutusta tierakenteen käyttöikään on tutkittu laajasti muun muassa eurooppalaisessa Reflex-tutkimushankkeessa, jonka yhteydessä koetiekoneella on kuormitettu erilaisia vahvistettuja koerakenteita ja vertailtu tuloksia vastaaviin raudtoittamattomiin rakenteisiin. Reflex-kokeissa havaittiin voimakkain rakenteen elinikää lisäävä vaikutus, kun teräsverkko asennettiin sitomattomaan kantavaan kerrokseen (Korkiala-Tanttu et al. 2003). Erityisen merkittävä vaikutus teräsverkolla havaittiin urautumisnopeuteen. Teräsverkon vaurioitumista hidastava vaikutus todettiin myös sitä voimakkaammaksi, mitä alhaisempi rakenteen pinnalta mitattu kantavuus on.

Myös PEHKO-projektin aineiston tarkastelu motivoi teräsverkkojen käyttöä tierakenteessa, ja erityisesti kantavassa kerroksessa. Kantatien 58 tieosilla 26-33 on vuonna 2009 tehdyn rakenteen parantamisen yhteydessä asennettu teräsverkkoja kantavaan kerrokseen 20 – 30 cm syvyyteen. Teräsverkkoja on asennettu torjumaan ajourien väliin syntyvää pituushalkeilua, jota on virheellisesti epäilty roudan aiheuttamaksi, mutta jonka todelliseksi syntymekanismiksi on korkean BCI-arvon perusteella osoittautunut tyypin 2 urautuminen, johon liittyy urautumishalkeilua deformaantumista seuraavien poikkisuuntaisten vetojännitysten vaikutuksesta (Saarenketo 2016). Sattumalta verkkojen asennussyvyys on tasolla, jolla liikennekuormien aiheuttamien pystysuuntaisten leikkausvoimien on yleisesti todettu olevan suurimmillaan, ja jolla teräsverkko näin ollen tehokkaimmin alen-

taa pohjamaahan kohdistuvaa liikenteen kuormitusta. Kuusi vuotta myöhemmin tehdyissä PEHKO-mittauksissa havaitaan teräsverkkokohdissa selkeästi pienempi urasyvyys ja vähemmän päällystevaurioita kuin ilman teräsverkkoa kunnostetuissa kohdissa. Näin alkujaan väärän diagnoosin perusteella on aikanaan kuitenkin päädytty oikeaan kunnostustoimenpiteeseen.

Kuva 67 esittää erästä teräsverkkokohdetta kantatieltä 58. Näkymä on tieosan 26 paaluvälillä 0 – 1100. Vanhojen teräsverkkojen sijainti on tulkittu maatutkakuvasta ja osoitettu urakarttojen alla olevassa analyysipalkissa harmaalla värillä. Urakartoista havaitaan etenkin ulkourissa paikoin voimakasta urautumista ja reunapainumaa (punainen – musta), joiden yhteydessä päällyste on pahoin halkeillut (video). Teräsverkkojen kohdalla urautuminen on huomattavasti vähäisempää ja päällystelaatta ehjä, vaikka pohjamaan kantavuuspuutteita indikoiva BCI (sininen pylväsdiagrammi) onkin edelleen korkea ja muiden tehtyjen analyysien perusteella koko kuvan paaluvälillä esiintyy kuivatuspuutteita. PEHKO-projektin yhteydessä tehtyjen tarkastelujen mukaan tien 58 teräsverkkokohteissa keskimääräisen urakasvun on raportoitu olevan alle 1 mm/v, kun tien muilla osuuksilla urakasvu on ollut jopa 3 – 4 mm/v. Luonnollisesti vahvisteverkon käytöllä ei ole vaikutusta tienpinnan mekaanisesta kulutuksesta aiheutuvaan urautumiseen, joka siis on etupäässä talvista nastarengaskulumista.



Kuva 67: Teräsverkkojen vaikutus urautumisen vähenemiseen. Esimerkki on kantatieltä 58 tieosalta 26. Paaluvälillä 600 – 1000 teräsverkon käyttö näyttäisi vasemman laidan maaperäkartan perusteella liittyvän siirtymäkiilaongelmien hallintaan moreenisen (ruskea) ja turvepitoisen (harmaa) pohjamaan välillä.

Myös Lapin alueen PEHKO-kohteilla on melko runsaasti teräsverkoin vahvistettuja osuuksia. Näiden joukossa on huomattava määrä vanhoja kohteita, joilla vahvisteverkko on asennettu kantavan kerroksen sijaan päällysteeseen. Ratkaisu on sikäli perusteltu, että

pohjoisessa teräsverkkojen tarkoitus on ollut ensisijaisesti hillitä päällysteen routa- ja pakkashalkeilua, tai routahalkeiluksi luultua alusrakenteen ja pohjamaan deformatiivisesta seurannutta pituushalkeilua. Verkon asentaminen päällysteeseen on myös toimenpiteenä hinnaltaan halvempi kuin asentaminen kantavaan kerrokseen. Lähelle pintaa asennettuna verkko ei kuitenkaan vähennä tien kantavuuspuutteista johtuvaa urautumista ja halkeilua. Lisäksi päällysteeseen asennettuna riskinä on, että vahvisteen päälle jää asennettaessa suunniteltua vähemmän asfalttimassaa, jolloin teräsverkko saattaa etenkin tien reunoilla alkaa heijastua päällysteen läpi pintaan. Lisäksi päällysteeseen asennetun verkon poistaminen on työlästä, joten tämän kaltaisten teräsverkkokohteiden uudelleenpäällystäminen ajoissa ennen vaurioiden syntymistä on hyvin perusteltua.

Lapin alueellakin on nyttemmin luovuttu uusien vahvisteverkkojen asentamisesta päällysteeseen, sillä kokemukseräisesti on todettu, että sama routahalkeilua hillitsevä vaikutus saavutetaan myös sijoittamalla verkko kantavaan kerrokseen. Samalla saadaan alennettua tien pinnasta pohjamaahan kohdistuvia jännityksiä ja hillittyä kantavuuspuutteista aiheutuvia tierakenteen vaurioita tehokkaasti.

Eräs teräsverkon käytön selkeä etu on lisäksi, ettei rakenteen kokonaispaksuutta tarvitse kasvattaa. Näin rakenteen oman painon kasvusta aiheutuvia painumia ei synny ja yhteydet ympäröivään maankäyttöön säilyvät entisen kaltaisina. Kokemukseen pohjautuen on myös arvioitu, että teräsverkon asentamista seuraava liikennekuormituksen tasaisempi jakautuma tierakenteessa pudottaa pohjamaan BCI-arvoa 20 – 30 yksikköä. Syy siihen, etteivät PEHKO-projektin teräsverkkokohteet erotu nyt tehdyissä TSD-mittauksissa BCI-arvon osalta ympäröivää rakennetta parempina, lienee etupäässä se, että verkkoja on alun perin asennettu vain kaikkein vakavimmista kantavuuspuutteista kärsineisiin kohtiin, joissa BCI:n voi ajatella olleen lähtötilanteessa vielä nykyistäkin korkeampi ja verkon käytön laskeneen sitä ympäröivän rakenteen tasolle. Joka tapauksessa teräsverkkokohteissa todetut vauriot ovat kuitenkin huomattavasti vähäisempiä, kuin mitä BCI-arvojen perusteella voisi olettaa. Edulliseksi ja toimivaksi todettuja teräsverkkoja on PEHKO-projektin puitteissa ehdotettu asennettavaksi useisiin toimenpiteitä vaativiin kohteisiin.

8. TSD:N KEHITTÄMISTARPEET

8.1 Lämpötilakorjauksen toimivuus

Keski-Suomessa erittäin helteisissä olosuhteissa tehdyt TSD-mittaukset osoittavat, että nykyinen TPPT-menetelmän mukainen lämpötilojen normalisointimenettely ei onnistu täysin luotettavasti korjaamaan taipumia standardilämpötilaa vastaavalle tasolle. Lisäksi virhe on eri etäisyyksillä kuormituspisteestä mitatuille taipumille hieman erisuuruinen, jolloin vääristymää aiheutuu myös taipumista laskettujen parametrien arvoihin. Ongelma korostuu entisestään päällystepaksuuden kasvaessa.

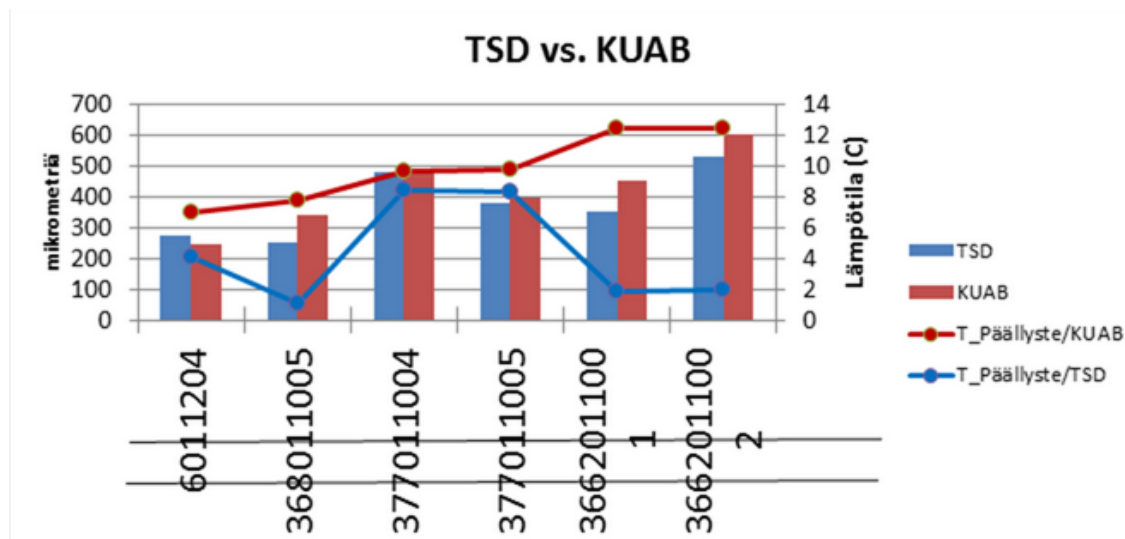
Luultavasti lämpötilakorjauksen puutteet eivät kosketa ainoastaan Suomessa mitattuja TSD-taipumia, vaan samoihin vaikeuksiin jouduttaisiin myös yhtä helteisissä olosuhteissa mitattujen PPL-taipumien kanssa. Näin PEHKO-mittausten kokemuksia ei voida pitää argumenttina TSD-menetelmän käytettävyyttä vastaan, vaan pikemminkin Keski-Suomen huono TSD- ja PPL-tulosten korrelaatio paljasti ongelman, joka liittyy yleisemminkin suomalaisittain erittäin korkeissa lämpötiloissa rekisteröidyn kuormitusvasteen normalisointiin.

Puhtaasti TSD-menetelmän käytettävyyttä ja tulosten PPL-vertailukelpoisuutta arvioitaessa kannattaa ennemmin huomioida Pohjois-Suomessa lähempänä standardiolosuhteita saadut TSD-tulokset. Näiden korrelaatio pudotuspainolaitteella saatujen taipumien sekä niistä laskettujen tunnuslukujen kanssa on hyvä.

Myös Virtala (2016) on kesän 2013 taipumamittausten perusteella havainnut, että maksimitaipumien ero TSD:llä ja PPL:lla mitattuna kasvoi lämpötilaeron kasvaessa (Kuva 68). Kuvasta havaitaan lisäksi, että korkeammassa lämpötilassa mitatut PPL-taipumat ovat kauttaaltaan suurempia kuin näitä viileämmässä mitatut TSD-taipumat, eli tilanne on sekä olosuhteiden että tulosten suuruusjärjestyksen osalta päinvastainen kuin PEHKO-mittauksissa kesällä 2015. Kesän 2013 mittaukset on tehty eri vuorokaudenaikaan, mutta samoina päivinä, joten muut olosuhteet (kosteus ym.) lienevät melko stabiilit eri tekniikoilla tehtyjen mittausten välillä. Tällöin lämpötila jää todennäköisimmäksi tulosten eroja selittäväksi tekijäksi.

Suomalaisten päällystettyjen teiden taipumatulosten voimakas lämpötilasensitiivisyys johtuu maassamme pakkaskestävyysvaatimusten vuoksi käytettyjen pehmeiden bitumisten sideaineiden ominaisuuksista. Lämpimämmissä maissa käytettyjen sideaineiden viskositeetti on huomattavasti korkeampi kuin Suomessa käytetyillä bitumeilla. Tällöin tavanomaisen lämpötilavaihtelun vaikutus taipumien suuruuteen jää vähäiseksi. Lisäksi päällysteet ovat usein paitsi jäykempiä niin myös paksumpia, joten tierakenteiden taipumataso on kaiken kaikkiaan alhainen. Näistä seikoista johtuen normalisointimenetelmien toimivuus ei ole samalla tavoin keskeistä kuin Suomessa.

Lämpötilakorjausmenetelmien kehittämistä hankaloittaa se, että päällysteen jäykkyyden lämpötilariippuvuus ei ole lineaarinen. Korkeassa lämpötilassa samaan jäykkyyden muutokseen riittää pienempi lämpötilan muutos kuin alhaisemmassa lämpötilassa. (Liimatta 1996, Spoof & Petäjä 2000b, s. 11 mukaan) Lisäksi lämpötilan noustessa tarpeeksi, alkaa päällysteen vaste muuttaa luonnettaan elastisesta viskoplastiseksi. Tämän muutoksen suhteen kriittisellä rajalla aletaan Suomessa käytetyillä B100 – B120 -bitumeilla olla jo päällysteen sisälämpötilan ylittäessä +25 °C.



Kuva 68: TSD/PPL keskimääräisen maksimitaipuman vertailua ja mittauslämpötilat v. 2013 suomalaisissa TSD-tutkimuksissa (Virtala).

TPPT-menetelmän mukainen lämpötilakorjaus on kuitenkin monia kansainvälisesti käytettyjä korjauskertoimia edistyneempi siinä, että se pyrkii huomioimaan päällystepaksuuden vaikutuksen. Päällyste on sekä koko tierakenteen jäykkyyden että jäykkyysominaisuuksien lämpötilariippuvuuden kannalta keskeisin tien rakennekerros. TPPT-kerroin on lisäksi yksinkertainen laskea, toisin kuin lämpötilahistorian huomioivat korjauskaavat. Missään nimessä koko menetelmää ei ongelmista huolimatta kannata hylätä, päinvastoin se on erittäin käyttökelpoinen, kunhan mittauslämpötila ei poikkea liiaksi standardiolosuhteista.

TPPT-menetelmän sopiva käyttöalue näyttäisi käytännön kokemuksen mukaan olevan päällysteen pinnasta mitatun lämpötilan pysyessä +5 ja +25 °C välillä. Tätä korkeamassa lämpötilassa päällysteen elastisuus vähenee ja kuormitusvaste muuttuu. Viskoplastisessa tilassa myös mitatessa käytetty ajonopeus saattaa alkaa vaikuttaa TSD-mittauksen tuloksiin. Ilmiö on havaittu paksuilla päällysteillä brittiläisissä tutkimuksissa (Ferne et al. 2009, Baltzer et al. 2010, s. 3 mukaan).

Näin ollen lämpötilan kohotessa Keski-Suomen ongelmallisimpien PEHKO-mittausten lukemiin aletaan taipumien normalisoinnin kannalta olla niin monipolvisen ongelman edessä, että tavanomaisilla vain lämpötilaeron ja mahdollisesti päällystepaksuuden huomioivilla korjauskertoimilla sen ratkaiseminen ei ole mahdollista. Niinpä PEHKO-projektinkin kokemusten perusteella suomalaisten teiden taipumamittauksissa olisi ainakin

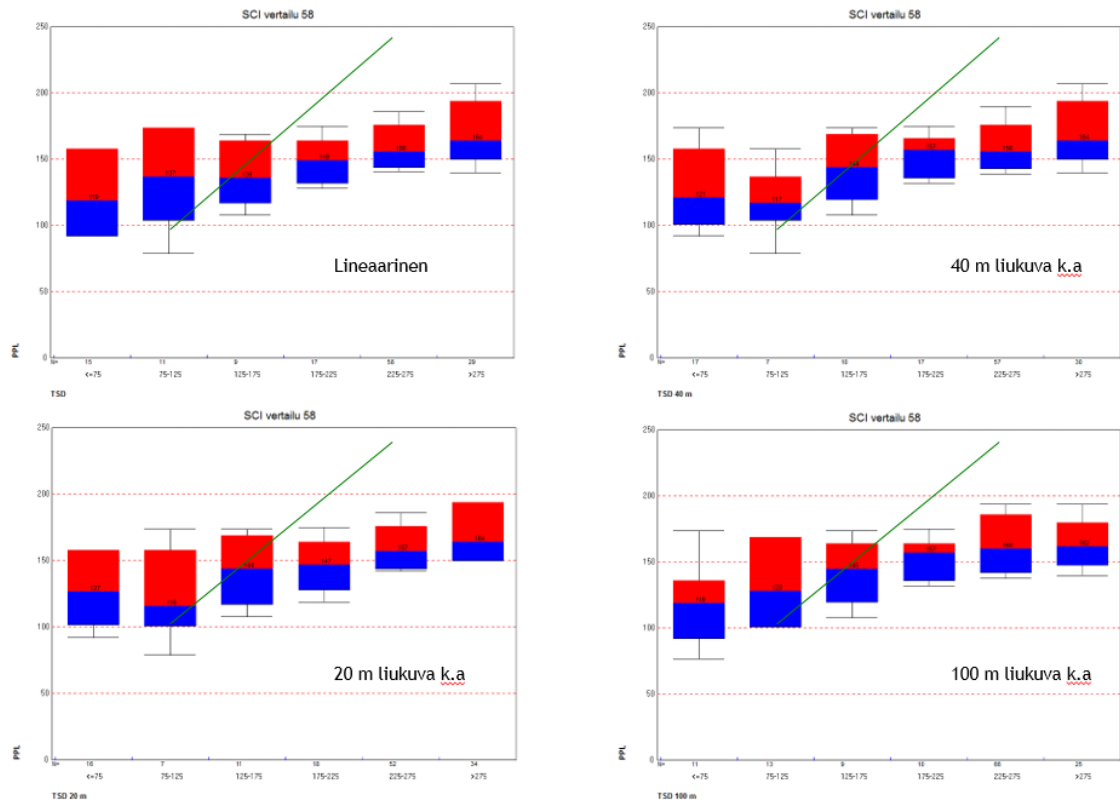
toistaiseksi suositeltavaa pitäytyä Suomessa käytetyille bitumilaaduille optimaalisella +5 ja +25 °C välisellä lämpötila-alueella. Käytännössä siis suomalaisten teiden taipumamittaukset tulisi ajoittaa elo-syyskuulle (mahdollisesti lokakuullekin), jolloin lämpötila varmimmin pysyy suositelluissa rajoissa. Heinäkuussa hellepäivien todennäköisyys on suurin ja kesäkuussa saattaa vielä ainakin osassa maata rakenteissa esiintyä routaa tai roudan sulamisesta aiheutunutta kosteutta.

8.2 Muut mittaustuloksiin vaikuttavat tekijät

TSD-taipumien tulostusväliksi on Suomessa vakiintumassa 10 m liukuva keskiarvo. Spekulaatiivista on, kätkeekö käytetty tulostusväli jotakin taipumien vaihtelua etenkin pohja-suhteiden ollessa vaihtelevat. Tämän työn puitteissa toimitetun aineiston perusteella tämän kaltaista tarkastelua on mahdotonta tehdä, koska tulokset on toimitettu laitevalmistajan ohjelmilla juuri tälle tulostusvälille prosessoituna.

Selvää on kuitenkin, että mittauksen aikana TSD:n laserantureiden tallentamaan dataan tulee mukaan niin paljon kohinaa, että tulosten luotettavuuden kannalta ainakaan merkittävästi pienipiirteisempään tulostustarkkuuteen siirtyminen ei tuo parannusta. Jo 10 metrin tulostusvälillä suomalaisissa toistokokeissa on havaittu toistettavuuden kärsivän nimenomaan yksittäisten poikkeamien takia (Virtala 2016, s. 44). Jotkin pistemäiset rakenteet, kuten siirtymäkiilat, on PEHKO-projektin yhteydessä tehdyissä tarkasteluissa havaittu kohteiksi, joissa TSD:n 10 metrin tulostustarkkuus ei ole esimerkiksi moduulien laskennan kannalta riittävä. Kyse on kuitenkin erikoisrakenteista, joiden kohdalla tierakenteen ominaisuudet muuttuvat erityisen voimakkaasti.

Sen sijaan selvää on, että käytetyllä tulostusvälillä TSD:n kohina ei merkittävästi heikennä tulosten laatua. TSD-tulosten keskiarvoistaminen 10 metrin väleille pidemmällä liukuvilla keskiarvoilla ei juurikaan paranna ainakaan TSD/PPL-korrelaatiota (Kuva 69). Kuvan esimerkissä kokeiluja on tehty 20, 40 ja 100 metrin keskiarvoilla. Vaikutus korrelaatioon ja tulosten hajontaan on lähes olematon.



Kuva 69: TSD-tulosten erilaisten liukuvien keskiarvojen vaikutus SCI-arvon TSD/PPL-korrelaatioon kantatien 58 kolmella vertailutieosalla. Kuvaajissa pystyakselilla on PPL-taipumista lasketut SCI-arvot välillä 0 – 250 ja vaaka-askeleilla puolestaan vastaavat arvot TSD-taipumista laskettuna. Vihreä suora edustaa korrelaatiokertoimen arvoa 1.

9. KANTAVUUSLASKENTA TSD-TAIPUMISTA

TSD-menetelmän käytettävyys diagnostiikan ohella rakenteen parantamisen suunnittelussa on riippuvainen moduulilaskennan onnistumisesta TSD-taipumien pohjalta. Tässä kappaleessa tarkastellaan sekä takaisinlaskennalla määritettävien yksittäisten rakennekerrosten jäykkyyssmoduulien laskentaa että näistä edelleen Odemarkin menetelmällä tehtävää tierakenteen lähtökantavuuden määrittystä. Referenssinä käytetään PPL-taipumista saatavia vastaavia tuloksia.

Rakennekerrosmoduuleja tarkastellaan kahdella TSD/PPL-vertailutiesalla. Lapin PEHKO-alueella on tehty moduulilaskentaa seututien 924 rakenteen parantamisen suunnitteluun liittyen, joten tässä yhteydessä on luontevaa hyödyntää tien valmiiksi laskettuja tuloksia. Toinen tarkasteltava kohde on Keski-Suomen PEHKO-alueelta kantatieltä 58. Näin saadaan tässäkin vertailussa Keski-Suomen ja Lapin TSD-mittauksiin liittyvien olosuhdetekijöiden mahdolliset vaikutukset esiin ja toisaalta Keski-Suomen osalta vapautetaan tiehen 77 liittyvistä edustavuusongelmista. Keski-Suomen PEHKO-aineistolla moduulilaskentaa ei oltu aiemmin tehty, joten valmiita tuloksia ei ollut saatavissa. Tämän työn yhteydessä tien 58 moduulilaskennassa on kokeiltu takaisinlaskennan lisäksi forward calculation -menetelmää, jonka periaatetta sivutaan kappaleen 9.1 loppupuolella laskennan tulosten esittelyn yhteydessä.

9.1 Rakennekerrosmoduulien laskenta

Rakennekerrosmoduulien laskenta tapahtuu Elmod-ohjelmalla Road Doctoriin liitetyn linkin kautta. Elmod on pudotuspainolaitevalmistaja Dynatestin kehittämä ja tarkoitettu laskemaan moduuleja pistekohtaisen taipumamittauksen tuloksista. Elmod-laskenta lukee kerrospaksuudet suoraan maatutkakuviin tulkituista kerrosrajoista, joita tyypillisesti ovat ilmastiantennin kuvasta tulkitut päällysteen ja kantavan kerroksen alapinnat (Kuva 71) sekä maavasteantennin kuvasta tulkittu koko tierakenteen alapinta. Moduulilaskenta on mahdollista tehdä karkealla tarkkuudella myös jättämällä kantava kerros kokonaan tulkittamatta. Näin on menetelty tien 924 tapauksessa, jossa pääpaino on ollut selvittää rakennekerrosmoduulien perusteella laskettava tien lähtökantavuus.

Rakennekerrosten muodonmuutosmoduulien takaisinlaskentaan liittyy muutamia yksinkertaistuksia ja oletamuksia. Taustalla olevan teorian mukaan esimerkiksi maamateriaalin muodonmuutosominaisuuksia pidetään vakioina joka suunnassa. Ominaisuuksien myös oletetaan pysyvän muuttumattomina kerroksen sisällä, vaikka tosiasiasa vallitsevalla jännitystilalla on vaikutusta materiaalin jäykkyyteen. Näin ollen laskennan tuottamat moduuliarvot ovat vain materiaalin todellisten jäykkyyssominaisuuksien estimaatteja.

Myös käytännön syyt edellyttävät joitakin laskentaa helpottavia yksinkertaistuksia. Esimerkiksi kerrosrajojen tulee jatkua yhtäjaksoisina läpi tarkasteltavan laskentajakson, eikä

rakennekerrosten lukumäärä voi vaihdella. Näistä syistä pitäydytään tyypillisesti ainoastaan päällysteen ja kantavan kerroksen alapintojen sekä rakenteen kokonaispaksuuden tulkinnoissa, jolloin laskenta tuottaa moduuliarvot päällysteelle, kantavalle kerrokselle sekä muulle kantavan kerroksen alapuoliselle sitomattomalle rakenteelle käsittäen jakavan kerroksen sekä mahdolliset paikalliset suodatinkerrokset ja muut vastaavat rakenteet. Näissä kerroksissa käytettyjen materiaalien moduuliarvot ovat verraten pieniä ja arvojen vaihtelu vähäistä (Taulukko 8). Niinpä tämän kaltaisen rakennekerrosten joukon vaikutus tierakenteen kantavuuteen perustuukin yksittäisten kerrosten materiaaliominaisuuksien sijaan etupäässä kerrosten yhteenlaskettuun paksuuteen.

Taulukko 8: Rakennekerrosten tyypillisiä jäykkyyshmoduuleita Suomessa (Roadscanners Oy).

Materiaali	Moduuli [MPa]
Asfaltti	1000 – 5000
Muut bitumilla sidotut kerrokset	700 – 3000
Sitomaton kantava	80 – 400
Muut sitomattomat kerrokset	40 – 200
Pohjamaa	5 – 150

Onnistuakseen ongelmitta rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta edellyttää määrättyjen ehtojen täyttymistä. Näistä keskeisin on rakenteelta vaadittava noin 60 mm vähimmäispäällystepaksuus. Alhaisen päällystepaksuuden vuoksi laskenta saattaa tuottaa virheellisiä rakennekerrosten moduuliarvoja etenkin suomalaisilla alemmipiluokkaisilla teillä. Ongelmia saattaa aiheutua myös, mikäli päällystepaksuus on tulkittu väärin. Ohuen tai todellista ohuemmaksi tulkitun päällystekerroksen tapauksessa laskenta tuottaa päällysteelle liian korkeita moduuliarvoja, joita puolestaan muiden rakennekerrosten saamat jäykkyydet pyrkivät kompensoimaan. Suomalaisilla päällysteillä 8000 MPa ylittäviä moduuliarvoja voidaan pitää epärealistisen korkeina (Saarenketo 2016). Liian paksuksi tulkittuna tilanne aiheuttaa tulosten päinvastaista vääristymää. Laskennan sensitiivisyys koskee myös muiden kerrosten tulkintoja, mutta korostuu jäykimmän rakenneosan – päällysteen – kohdalla.

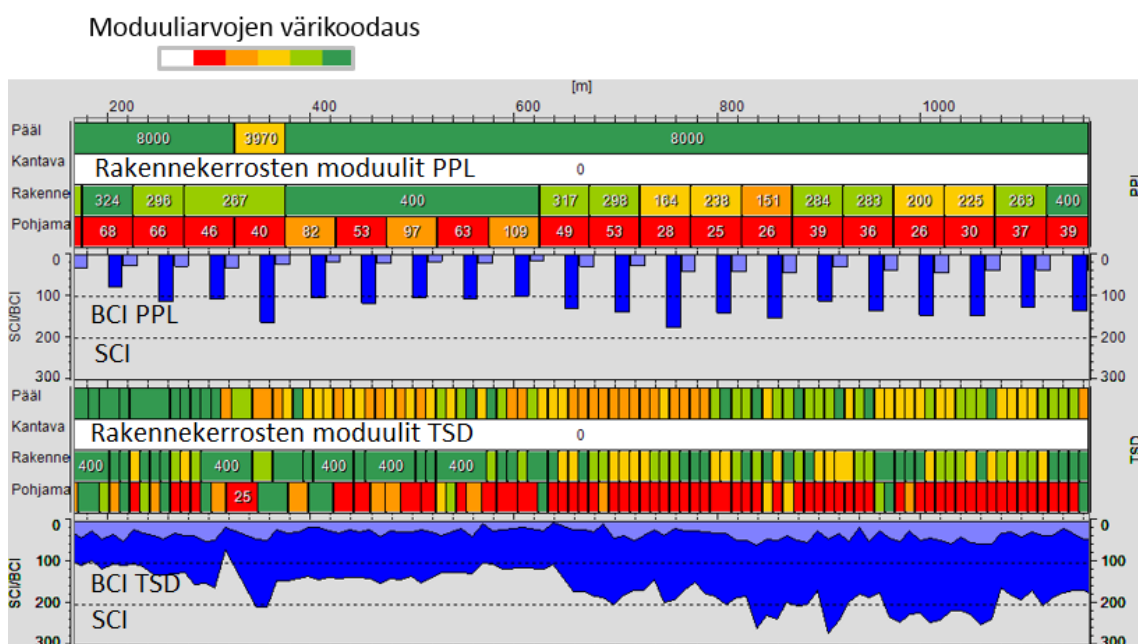
Seututien 924 PPL- ja TSD-taipumista lasketut rakennekerrosmoduulit on vertailua varten viety samaan Road Doctorin näkymään (Kuva 70). Takaisinlaskenta Elmod-ohjelmalla tapahtuu kussakin taipumamittauspisteessä erikseen, joten jatkuvan taipumamittauksen tuloksista moduulit saadaan tiheämmin kuin PPL-taipumista laskettaessa. Moduuliarvojen paremmuusjärjestys on ilmaistu viisiportaisella väriskaalalla siten, että huonoimmat arvot on esitetty punaisella ja parhaat tumman vihreällä. Valkoinen väri kuvaa mittauspisteitä, joille laskenta ei ole kyennyt tuottamaan arvoa lainkaan. Esimerkin tapauksessa koko kantava kerros on esitetty valkoisella värillä, koska tien 924 laskennassa kaikki sitomattomat kerrokset on käsitelty yhtenä kokonaisuutena.

Luokkarajat määräytyvät moduulin maksimiarvon perusteella. Päällysteelle asetettu suurin mahdollinen moduuliarvo on 8000 MPa, kantavalle kerrokselle 600 MPa ja muulle

rakenteelle sekä pohjamaalle 400 MPa. Maksimiarvon ylittävät moduulit luokitellaan automattisesti ylimpään luokkaan.

Muista rakennekerroksista poiketen pohjamaan moduuliarvot eivät ole takaisinlaskennan tuottamia, koska pohjamaan moduulien takaisinlaskenta vaatii etenkin pehmeillä maapohjilla vaihtelevien kertoimien käyttämistä ja on näin ollen melko haastavaa. Pohjamaan moduulina onkin käytetty Road Doctorin omalla Bearing Capacity Analyses -työkalulla laskettua Vägverketin pohjamaan ja alusrakenteen moduulia, jonka laskentakaava on esitelty kappaleessa 3.4.

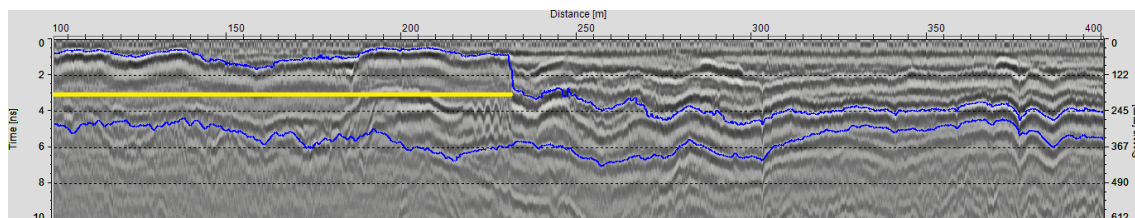
Tien 924 tuloksista (Kuva 70) nähdään, että etenkin TSD- ja PPL-taipumista lasketuissa sitomattoman rakenteen moduuliarvoissa on nähtävissä samanlaisia trendejä, joita myös SCI- ja BCI-kuvaajat myötäilevät. Päällysteen moduulissa puolestaan ei PPL-taipumista laskettuna erotu analyysipalkissa juurikaan vaihtelua. Lisäksi nähdään, että PPL-taipumista laskettu päällysteen jäykkyysmoduuli on liian korkea. Tulosten esitystavan heikkous on, että kaikki maksimin ylittävät arvot pyöristyvät analyysipalkissa alaspäin parhaan luokan maksimiarvoon 8000 MPa, jolloin virheen suuruutta on hankala arvioida.



Kuva 70: Rakennekerrosten PPL- ja TSD-jäykkyysmoduulit sekä SCI- ja BCI-arvot seututien 924 tieosalla 1. Moduuliarvojen värikoodaus on esitetty yllä: parhaat arvot tulostuvat vihreällä, alhaisimmat punaisella. Luokkarajat riippuvat rakennekerroksesta.

Kantatieltä 58 tarkasteluun on otettu tieosa 38. Tiellä on vuonna 2013 perusrakennuksen yhteydessä tehty runsaasti sekoitusjyrsintää, mikä hankaloittaa paikoitellen kantavan kerroksen tulkintaa. Lisäksi tielle on asennettu melko tiheästi teräsverkkoja. Valitulla tieosalla teräsverkkoja on vähemmän ja kantavan kerroksen tai sekoitusjyrsinnän pohja on selvemmin nähtävissä kuin toisella pituudeltaan edustavalla TSD/PPL -vertailutiesalla 26. Myös päällyste on keskimäärin hieman paksumpi, joskin päällystepaksuus vaihtelee huomattavasti (Kuva 71). Samaan kuvaan on keltaisella värillä korostettu sekoitusjyrsityn

osuuden erottuminen maatutkakuvassa. Sekoitusjyrsityt osuudet erottuvat myös selvästi muuta tieosaa ohuemman päällysteen johdosta. Jyrsittyihin kohtiin on levitetty uusi 70 mm päällystelaatta, kun taas muilla osuuksilla on tehty vastaavan paksuinen massapinta vanhan laatan päälle, mikä näkyy tutkakuvassa suurempana päällysteen kokonaispaksuutena ja useina päällekkäisinä päällystekerroksina.

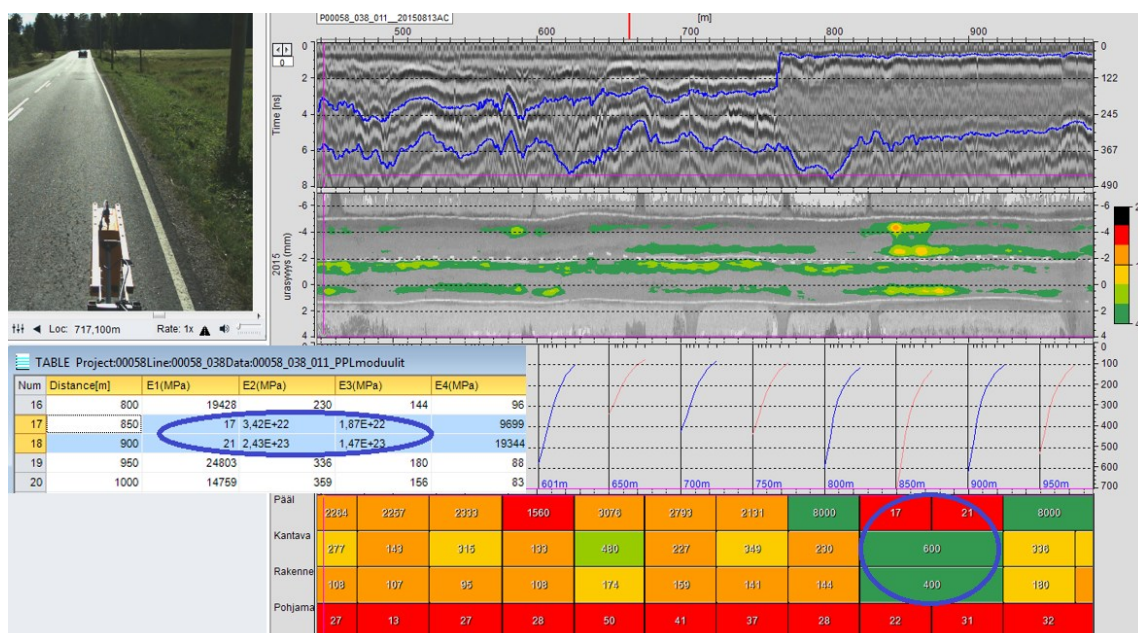


Kuva 71: Ilmavasteantennin tutkakuvaa tulkitut päällysteen ja kantavan kerroksen paksuudet sekä sekoitusjyrsityn jakson (keltainen) erottuminen maatutkakuvassa kantatien 58 tieosalla 38.

Tieosan takaisinlaskennan tuloksissa esiintyy jonkin verran Elmod-laskennalle tyypillisiä korruptoituneita laskentapisteitä, joissa moduulilaskennan tuloksissa on karkeita virheitä (Kuva 72). Kuvan analyysipalkkiin sinisellä ympyrällä merkitty kohta on eräs virheellisistä laskentapisteistä. Kuvaan liitettyssä taulukossa näkyvät vastaavat moduuliarvot numeerisina.

PPL-taipumista laskettuna esimerkin kaltaisia korruptoituneita laskentapisteitä on 14 % koko aineistosta. Jatkovaa taipumatietoa käytettäessä laskentapisteistä on kasvusuunnassa 19 % ja laskusuunnassa 17 % edellä kuvatulla tavalla virheellisiä, joten mitenkään kriittisestä ilmiöstä ei ole kyse. Virheiden lähde on helppoa yhdistää tulkittuihin rakenekerrostaloksiin, sillä virhepisteet sijoittuvat samaa kerrostalokintaa käyttävissä moduulilaskennoissa likimain samoihin kohtiin riippumatta siitä, käytetäänkö laskennassa jatkuvaa vai pistekohtaista taipumatietoa. Myös taipumasuppiloiden muoto on näissä kohdissa täysin normaali.

Virhe aiheutuu mitä ilmeisimmin joko laskennan kannalta liian ohuesta päällystepaksuudesta, päällystetulkinnan virheistä tai siitä, että päällystekerroksen jäykkyys ei yksinkertaisesti vastaa laatan paksuuden edellyttämää teoreettista jäykkyyttä esimerkiksi pitkälle edenneen vaurioitumisen seurauksena. Ohuilla päällysteillä myös kantavan kerroksen stabiloinnilla tai muilla vastaavilla lujitustoimenpiteillä saattaa olla samanlainen vaikutus. Laskennan virheille voi altistaa myös tilanne, jossa tutkakuva ja taipumatieto eivät ole poikkisuunnassa keskenään samalta linjalta. Näin voi helposti käydä esimerkiksi TSD-mittauksessa, mikäli mittausajoneuvon annetaan huomattavasti oikoa kaarteissa ajourien ulkopuolelle. Toisaalta myös PPL-mittauksessa pudotuskohdat vuorottelevat tieosoitteen kasvu- ja laskusuuntien ulkourissa vaikka laskenta tehdään vain jommankumman suunnan kerrostulkintoihin perustuen.



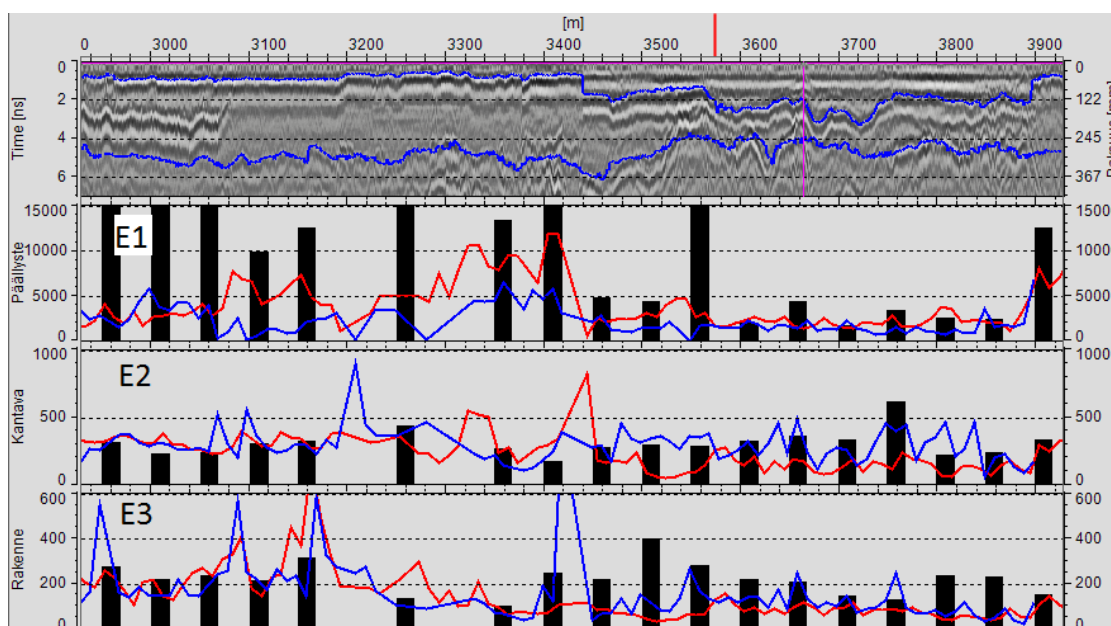
Kuva 72: Tyypillinen Elmod-moduulilaskennan virhe ja sen näkyminen Road Doctorin analyysipalkissa sekä taulukoiduissa moduuliarvoissa.

Värikoodattu analyysipalkki on melko sekava esitystapa TSD-taipumista tiheään saatavan moduulitiedon esittämiseen. Tulosten vertailun helpottamiseksi lasketut rakennekerrosmoduulit onkin karkeimpien virhepisteiden suodatuksen jälkeen viety pylväs- ja viivakuvaajiin (Kuva 73). Kuvassa on esitetty allekkain kantatien 58 tieosan 38 paaluväliltä 2900 – 3900 kunkin kerroksen rakennekerrosmoduulit E1 päällysteelle, E2 kantavalle kerrokselle ja E3 muulle rakenteelle. Mustat pylväät esittävät takaisinlaskennan PPL-taipumista ja suunnan 1 tutkatulkinnosta tuottamia moduuliarvoja, sininen viiva jatkuvan taipumamittauksen suunnan 1 tuloksista laskettuja moduuleita ja punainen viiva vastaavia moduuliarvoja laskettuna suunnan 2 jatkuvista taipumatuloksista. Suunnan 2 TSD-tulosten kanssa laskennassa on käytetty myös suunnan 2 maatutkatulkintoja.

TSD-taipumista laskettujen rakennekerrosten kasvu- ja laskusuuntien jäykkyysmoduulien havaitaan suodatuksen jälkeen olevan melko samansuuntaisia keskenään ja tunnistavan lisäksi rakenteesta kohtalaisella tarkkuudella samat heikommat ja vahvemmat jaksot kuin PPL-taipumista laskettu moduulikuvaajakin (Kuva 73). Kaikkein ongelmallisimpana näyttäytyy päällysteen moduuli ja nimenomaan jaksoilla, joilla päällystepaksuus on alhaisin, mikä on selvä osoitus Elmod-ohjelman takaisinlaskentamenetelmän rajoitteista. Erittäin ongelmalliseksi tilanne muodostuu, mikäli muiden kerrosten moduuliarvot pyrkivät kompensoimaan päällysteen rakenteen kokonaisjäykkyyteen aiheuttama vääristymää. Tällöin moduulilaskenta tuottaa kaikkien kerrosten osalta virheellisiä arvoja.

Luonnollisesti TSD-taipumista tehtävän moduulilaskennan tuloksiin heijastuu jossakin määrin myös TSD-taipumiin liittyvä PPL-tuloksia voimakkaampi hajonta. Hajontaa tuottaa toki rakenteen vasteen pituussuuntainen vaihtelu, mutta erityisesti voimakkaimpien vaihteluiden taustalla saattaa olla myös mittausmenetelmään tai -olosuhteisiin liittyvä

virhe. Näiden tyypillisesti pistemäisten poikkeamien poistamiseen voitaisiin ennen laskentaa käyttää erillisiä numeerisia suodattimia, mutta tässäkin yhteydessä on päädytty käyttämään TSD-taipumatietoa sellaisenaan.



Kuva 73: Rakennekerrosmoduuleja kantatien 58 tieosalla 38. Ylhäältä lukien päällyste, kantava kerros ja muut rakennekerrokset.

Huomionarvoista on lisäksi, että etenkin päällysteen moduulissa on nähtävissä paikoitellen selkeä tasoero, mikä ainakin osaltaan saattaa selittyä poikkeavilla mittauslämpötiloilla ja Elmod-laskennan lämpötilakorjauksen puutteilla. Toisaalta tämä oletamus on ristiriidassa sen kanssa, että tasoero on pienimmillään paksuimman päällysteen jaksoilla, joilla rakenteen taipumaominaisuuksien lämpötilasensitiivisyys on suurin. Silmiinpistävää on myös, että erot päällysteen moduulissa aiheutuvat etupäässä PPL-taipumista laskettujen moduulien epärealistisen suurista arvoista jaksoilla, joilla päällystepaksuus on suurin. Toisaalta tämäkin havainto voi käantä kysymykseen mittauslämpötilasta ja toimimattomasta lämpötilakorjauksesta, koska viimeimmässä mitatut PPL-taipumat ovat pienempiä kuin hellesäässä mitatut TSD-tulokset, jotka ilman toimivaa normalisointia ovat kenties lähempänä Elmodin teoreettista mallia päällystepaksuudesta ja sitä vastavasta päällysteen jäykkyydestä. Ilmiö saattaa olla merkittävä nimenomaan ohuilla päällysteillä, joilla laskentamenetelmän toimivuus on äärirajoillaan.

Elmod-laskennan pitäisi moduulien määrittelyn yhteydessä korjata taipumia mittauslämpötilaan perustuen joko suoraan pintalämpötilan perusteella tai tarkemmin lämpötilahistoriaan perustuen. Ohjelma lukee päällysteen ja ilman keskilämpötilan suoraan PPL-tulostiedostosta. TSD-tietokannasta ohjelma ei automaattisesti hae lämpötilatietoja, mutta keskilämpötilat voi halutessaan syöttää käsin. Ainakin käytetyssä Elmod-linkissä laskennan tuottamat moduuliarvot ovat kuitenkin aina samat riippumatta kentiin syötetyistä lämpötila-arvoista. Näin ollen normalisoinnin puutteiden vuoksi mittauslämpötilan vaikutus heijastuu suoraan TSD-taipumista laskettuihin rakennekerrosten moduuliarvoihin.

Dynatestin kehittämän Elmodin lämpötilakorjaus ei mitä ilmeisimmin toimi myöskään Kuabin pudotuspainolaitteella kerättyjen taipumatulosten kanssa. Tien 924 tuloksissa eromittauslämpötiloissa sekä TSD- ja PPL-moduulien suuruussuhteissa ovat samansuuntaiset kuin tiellä 58. Näin siitäkin huolimatta, että tiellä 924 TSD-taipumat on mitattu tavoitelämpötilan alapuolella, jolloin toimiessaan PPL-taipumien lämpötilakorjauksen pitäisi kääntää PPL-moduulit TSD-taipumista laskettuja alhaisemmiksi. Pienemmästä mittauslämpötilojen erosta johtuen tiellä 924 eri taipumista lasketut rakennekerrosmoduulit ovat kuitenkin lähempänä toisiaan kuin kantatien 58 tutkitulla tieosalla.

Kuten kappaleen alussa todettiin, moduulien takaisinlaskentaan liittyy useita yksinkertaistuksia, minkä vuoksi saadut tulokset ovat vain estimaatteja materiaalien todellisesta jännitystilasta ja muodonmuutoksen suhteesta. Materiaaliparametrien täsmällinen määrittäminen on mahdollista ainoastaan laboratoriokokeiden avulla. Takaisinlaskennan keinoin saadaan kuitenkin isommassa mittakaavassa kuva siitä, missä kohdissa tielinjaa sijaitsevat materiaaliominaisuuksien kannalta keskimääräistä heikommalla tai paremmalla jaksolla. Lisäksi on muistettava, että rakenteen lopullinen kantokyky määräytyy sekä materiaaliominaisuuksien että kerrospaksuuksien yhteisvaikutuksesta, minkä vuoksi pitäytyminen pelkkien rakennekerrosmoduulien tarkastelussa voi olla harhaanjohtavaa.

Forward calculation -menetelmä

Arvioidaan vielä lyhyesti rakennekerrosten moduulilaskentaa Road Doctorin forward calculation -toiminnon avulla käyttäen esimerkkinä edelleen tien 58 tieosaa 38. Forward calculation -laskenta käsittelee tierakennetta kolmena kerroksena, jotka ovat päällyste, sitomattomat rakennekerrokset sekä näiden alapuolinen pohjamaa sisältäen mahdolliset pengermateriaalit.

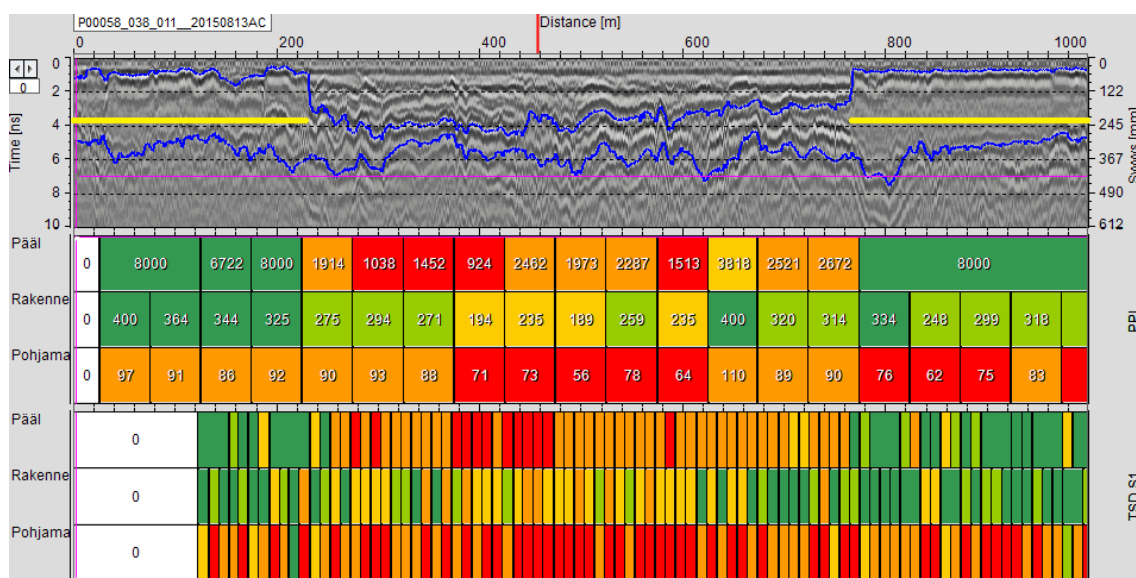
Laskentamenetelmä perustuu Yhdysvaltain liittovaltion tiehallinnon FHWA:n tilaamaan työhön, jossa eri takaisinlaskentaohjelmilla määritettiin rakennekerrosmoduuleja erilaisille sekä bitumilla että sementillä sidotuille rakenteille. Näin vaihtelevista rakenteista ja laskentojen näille kullekin tuottamista jäykkyysmoduuleista saatiin muodostettua valtava matriisi, joka yhdistää tietyistä materiaaleista tietyn paksuisina tehdyt kerrokset ja näitä vastaavat moduuliarvot. Tietokanta on tuotu Road Doctoriin. Käytännössä Forward calculation -toiminto tekee tietokantahaun syötetyn rakenteen perusteella.

Forward calculation -menetelmän tuottama jäykkyysmoduuli on takaisinlaskettuun arvoon verrattuna kaksinkertainen estimaatti. Lisäksi menetelmän rajoite on, että se käyttää rakenteen kuvaamiseen ainoastaan 3-kerrosmallia. Näistä seikoista huolimatta menetelmän on havaittu soveltuvan melko hyvin etenkin suomalaisten alempiluokkaisten teiden kantavuustarkasteluihin (Saarenketo 2016).

Forward calculation -menetelmässä myös pohjamaan moduuli haetaan matriisista, kun taas Road Doctorin takaisinlaskentaan ne tuotetaan kappaleessa 3.4 esitellyllä Vägverketin kaavalla. Näin ollen menetelmien tuottamat tulokset eivät ole pohjamaan moduulin osalta keskenään vertailukelpoisia.

Paaluvälin 0 – 1000 esimerkistä (Kuva 74) havaitaan, että yhteneväisyydet kuvan PPL- ja TSD-taipumista laskettujen arvojen välillä näyttäytyvät selkeinä. Tuloksissa ei myöskään ole samanlaista tasoeroa kuin takaisinlaskettujen moduuli-arvojen välillä, mikä osoittaa, että taipumien lämpötilakorjaus laskennan yhteydessä toimii. Lämpötilakorjaus on valittu tehtäväksi kappaleessa 3.3 kuvatun TPPT-menetelmän mukaisesti. Vaihtoehtona on myös yhdysvaltalainen LTPP-menetelmä. Samat trendit, jotka nähdään forward calculation -menetelmällä määritetyissä moduuleissa, on havaittavissa myös edellä esitellyissä vastaavan paaluvälin takaisinlasketuissa moduuli-arvoissa (Kuva 72).

Koska forward calculation -menetelmän tuottamat moduuli-arvot ovat peräisin tietokannasta, ei tuloksissa juurikaan esiinny karkean virheellisiä arvoja. Erittäin ohuilla päällysteillä takaisinlaskennan tuottama vääristymä kuitenkin luonnollisesti periytyy myös forward calculation -menetelmällä saataviin päällystekerroksen moduuleihin (Kuva 74). Toisaalta menetelmään liittyy vaara, että hyvinkin poikkeaviin taipumatuloksiin tai rakenteisiin saattaa liittyä näennäisesti järkeviä rakennekerrosten moduuli-arvoja.



Kuva 74: Forward calculation -menetelmällä määritettyjä rakennekerrosmoduuleita kantatien 58 tieosalla 38. Keltaisella viivalla on jälleen korostettu sekoitusjyrsittyjä osuuksia, joilla päällystepaksuus on muuta tieosaa alhaisempi.

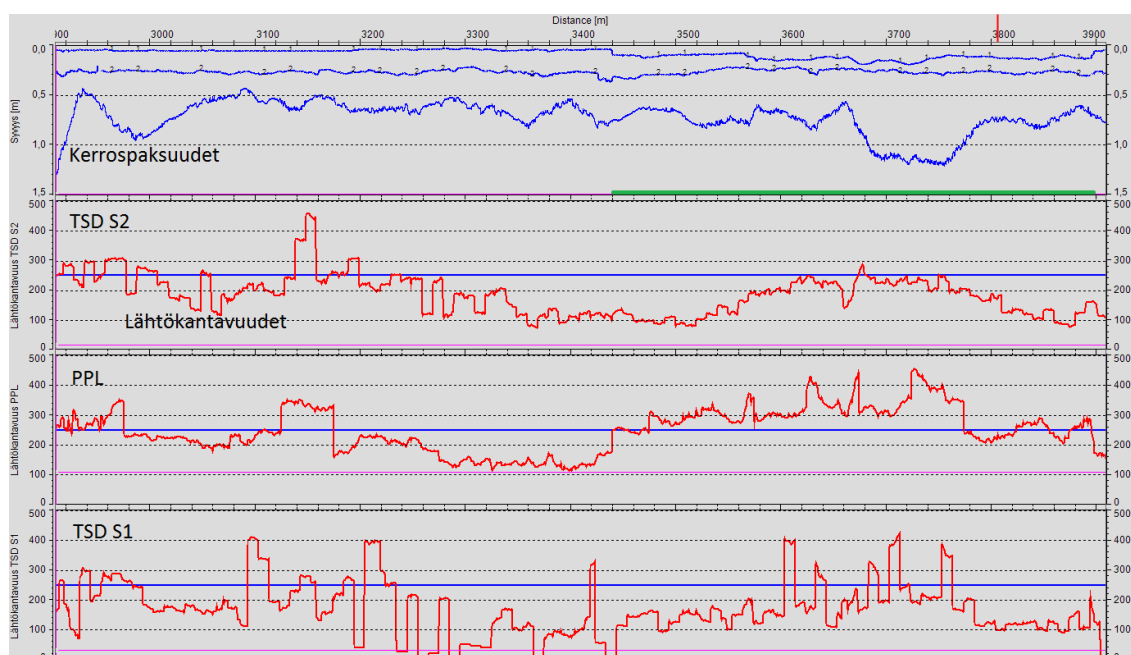
9.2 Lähtökantavuuden määrittäminen

Rakenteen parantamisen suunnittelun ja siihen liittyvän kantavuusmitoituksen kannalta yksittäisten rakennekerrosten moduuli-arvoja keskeisempää on niiden perusteella määritettävä koko tierakenteen lähtötilan kantavuus. Vertaamalla lähtökantavuutta tielle asetettuun tavoitekantavuuden arvoon, erottuvat jaksot, joilla tavoitekantavuuteen ei ylletä ja joilla riski liikennesäilytyksen aiheuttamaan vaurioitumiseen on suurin. Tavoitekantavuus on koko rakennetta kuvaava suure, jonka arvo määräytyy yksittäisten rakennekerrosten jäykkyysmoduulien sekä kerrospaksuuksien kumulatiivisen vaikutuksen perusteella pohjautuen Odemarkin kantavuusteoriaan.

Rakenteen lähtökantavuuden määrittämisen jälkeen voidaan kohteelle suunnitella parannustoimenpiteitä. Kun toimenpiteen vaikutus rakenteen jäykkyyteen tunnetaan, saadaan Odemarkin menetelmällä edelleen määritettyä tuloskantavuus, eli rakenteen kuormituskestävyys parannustoimenpiteiden jälkeen. Tavoitteena on valita materiaalit ja menetelmät siten, että rakenteen kokonaispaksuus säilyy mahdollisimman ohuena huomioiden kuitenkin routamitoituksen, tiegeometrian, ympäröivän maankäytön ym. vaatimukset. Lisäksi rakenteen suunnittelua ohjaavat lukuisat muutkin periaatteet liittyen muun muassa päällekkäisten rakennekerrosten jäykkyyksien suhteeseen.

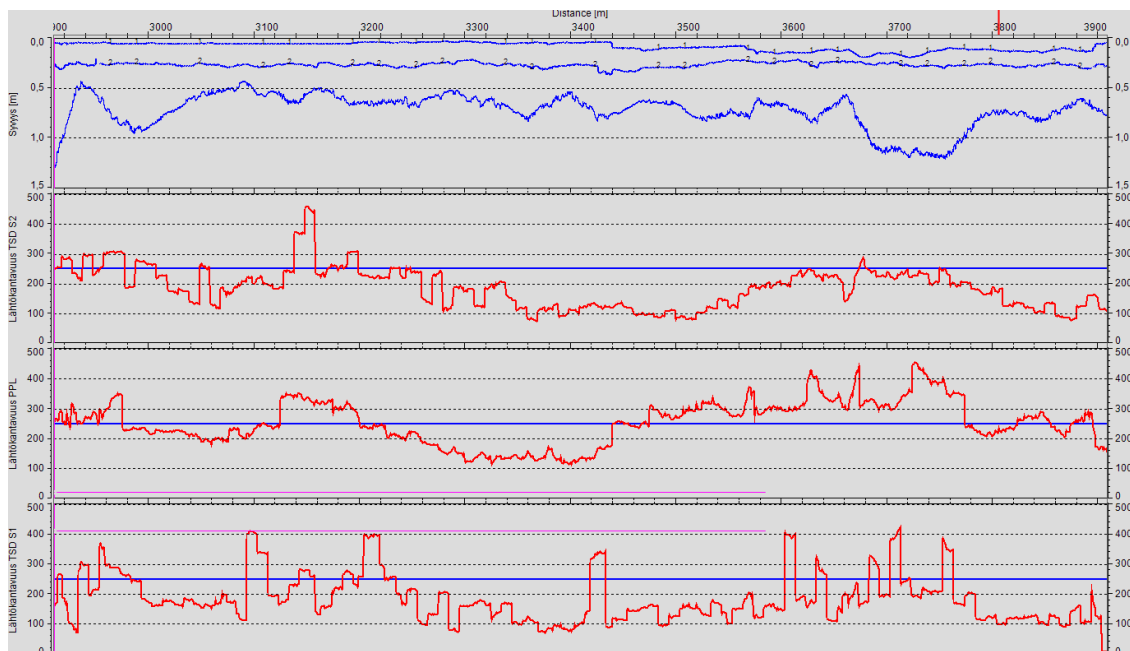
Tässä yhteydessä kiinnostavaa on kuitenkin, kuinka hyvin jatkuviin ja pistekohtaisiin taipumiin perustuvista rakennekerrosmoduuleista lasketut lähtökantavuudet korreloivat. Se määrää viime kädessä TSD-menetelmän soveltuvuuden diagnostiikan lisäksi suunnittelunkin työkaluksi.

Kappaleessa 9.1 takaisinlasketuista tien 58 tieosan 38 suodattamattomista rakennekerrosmoduuleista määritetyt lähtökantavuudet on koottu vertailua varten samaan Road Doctorin näkymään (Kuva 75). Kuva esittää paaluväliä 2900 – 3900. Kantavuuskuvaajissa sininen vaakaviiva edustaa tavoitekantavuutta, jonka arvoksi on annettu 250 MPa. PPL-taipumiin perustuva kuvaaja on lähinnä tavoitekantavuutta ja siinä erottuu selvästi vihreällä vaakaviivalla korostettu kasvavan päällystepaksuuden kantavuutta parantava vaikutus noin paaluvälillä 3400 – 3900. Kaikkien käyrien muodossa on havaittavissa samoja piirteitä, mutta tietyllä mittauslämpötilasta aiheutuvalla tasoerolla.



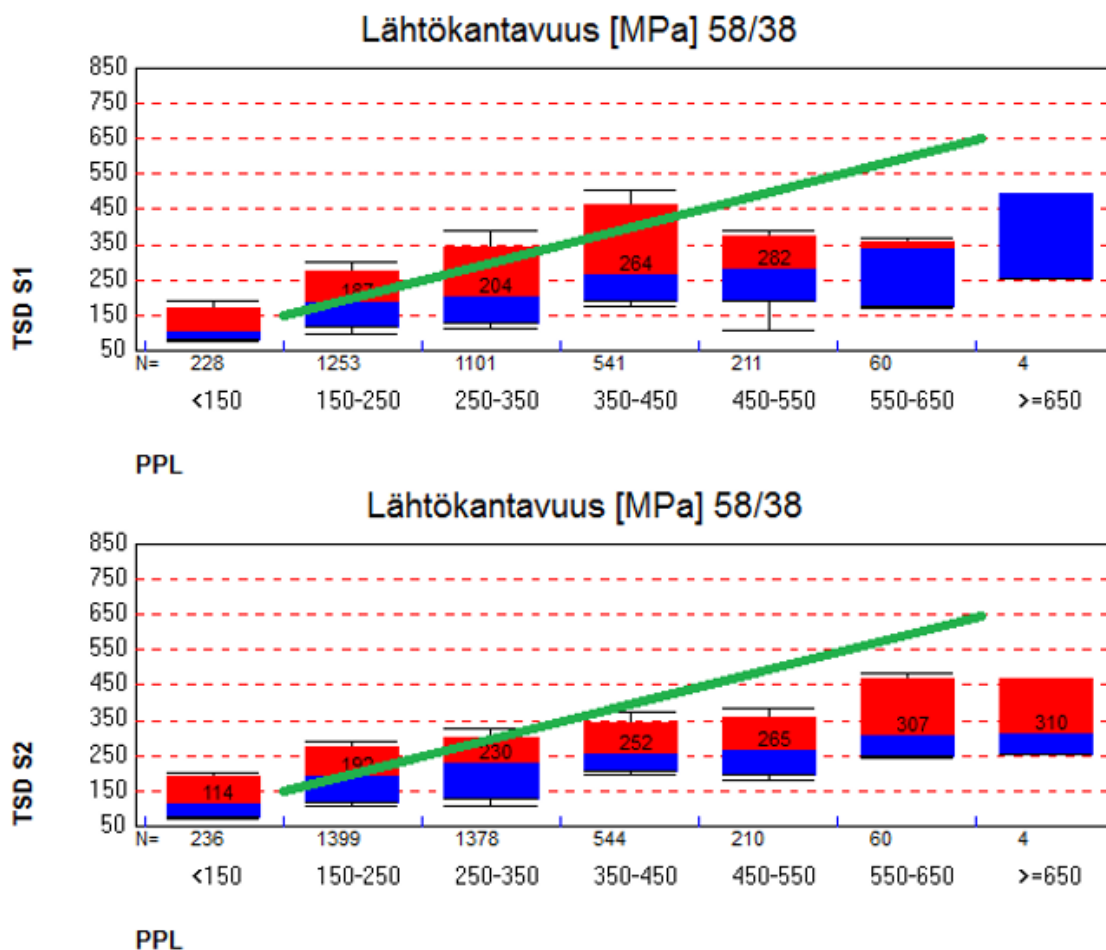
Kuva 75: Suodattamattomista rakennekerrosmoduuleista laskettu lähtökantavuus. Esimerkki kantatien 58 tieosalta 38.

Suodattamalla rakennekerrosten moduuleista kappaleessa 9.1 esitellyt karkean virheelliset arvot, saadaan etenkin TSD:n suunnan 1 tuloksista lasketun kuvaajan hajontaa pienennettyä (Kuva 76). Nyt kuvaajien muodon yhtäläisyydet tulevat paremmin esiin, mutta tasoero profiileissa toki säilyy.



Kuva 76: Lähtökantavuudet suodatuksen jälkeen. Esimerkki kantatien 58 tieosalta 38.

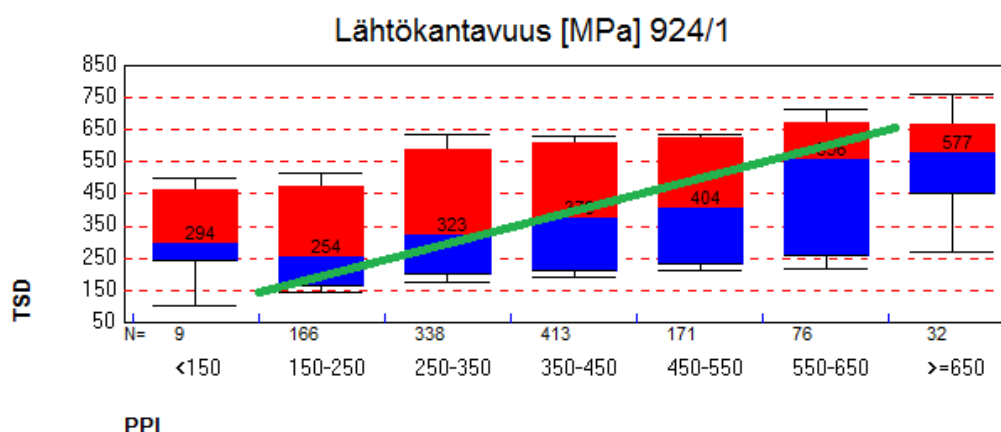
Samat havainnot TSD- ja PPL-taipumista laskettujen lähtökantavuuksien keskinäisestä suhteesta on tehtävissä myös tulosten korrelaation tilastollisessa tarkastelussa (Kuva 77). TSD-taipumista laskettu kantavuus jää vertailussa alhaisemmaksi kuin mitä tulosten täydellinen lineaarinen riippuvuus edellyttäisi. Suunnan 2 TSD-taipumia ja maatutkatulkintoja hyödyntävä laskenta näyttäisi lisäksi tilastojenkin valossa korreloivan paremmin PPL-kantavuuden kanssa kuin suunnan 1 jatkuvasta mittauksesta lasketut tulokset. Näin havaitaan, etteivät eri suuntien tutkatulkintojen mahdolliset pienet poikkeamat ainakaan merkittävästi heikennä tulosten korrelaatiota. Vertailu on tehty karkeista virheistä suodatuilla moduuliarvoilla.



Kuva 77: Korrelaatiokuvaajat TSD- ja PPL-taipumien perusteella määritettyjen lähtökantavuuksien keskinäisestä suhteesta kantatien 58 tieosalla 38. Vertailuun on otettu erikseen TSD:n kummankin mittaussuunnan aineisto. Vaaka-akselin PPL-kantavuus perustuu suunnan 1 rakennepaksuustulkintoihin.

Seuraavassa tilastossa (Kuva 78) on esitetty TSD- ja PPL-lähtökantavuuksien vertailu Lapista seututien 924 tieosalta 1, jota niin ikään käsiteltiin edellä rakennekerrosmoduulien laskennan yhteydessä. Tuloksissa silmiinpistävää on mediaaniarvojen osalta huomattavasti tien 58 vertailua parempi korrelaatio, joskin luokkien sisäinen hajonta on melko voimakasta.

Tilastoja vertaamalla nähdään selkeästi myös, että lähtökantavuus on tien 924 tutkitulla tieosalla selvästi tien 58 kantavuutta parempi. Tien 58 tutkitulla tieosalla moduuliarvot painottuvat välille 150 – 350 MPa, kun taas tiellä 924 vastaava väli on 250 – 450 MPa. Vähäisempi alkiodien määrä tien 924 tilastossa selittyy sillä, että arvot on valittu laskettavaksi viiden metrin välein tiellä 58 käytetyn metrin tarkasteluvälin sijaan. Pidempi laskentaväli poistaa kuvaajasta pienipiirteistä kerrosrajojen tulkinnoista aiheutuvaa vaihtelua, mutta ei isommassa mittakaavassa vaikuta kuvaajan muotoon.

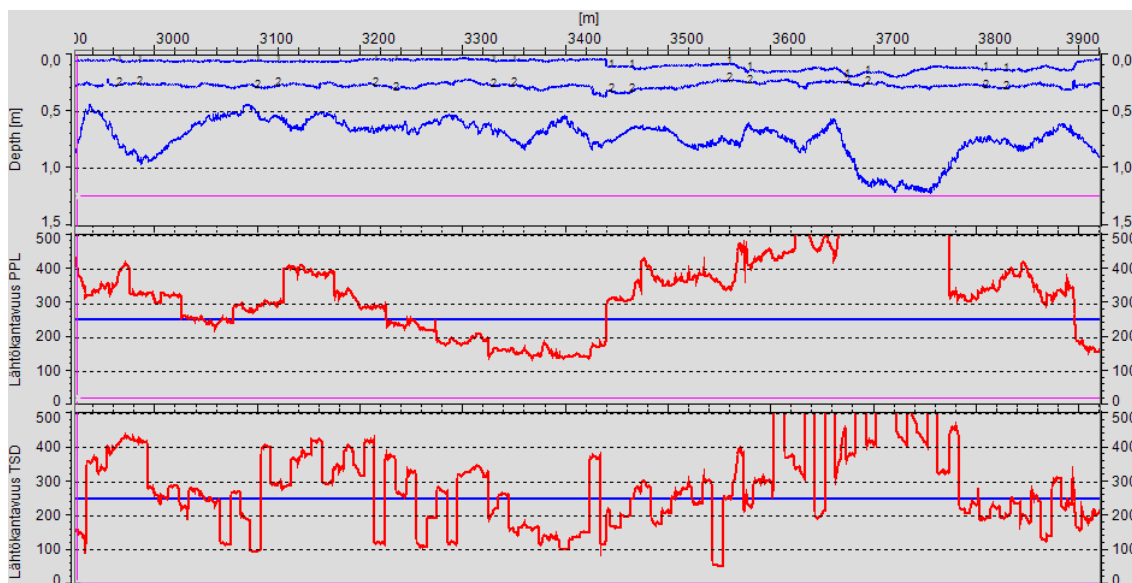


Kuva 78: TSD- ja PPL-taipumien perusteella määritettyjen lähtökantavuuksien korrelaatio seututien 924 tieosalla 1.

Suurin yksittäinen jatkuvaan ja pistekohtaiseen taipumatietoon pohjaavien lähtökantavuuksien laskennan korrelaatiota heikentävä tekijä on Elmod-laskennan lämpötilakorjauksen toimimattomuus. Helteisissä olosuhteissa mitatuista TSD-taipumista laskenta tuotti pääosin heikommät rakennekerrosten moduulit kuin viileämmässä tehdyistä PPL-mittauksen tuloksista, mikä heijastuu suoraan myös lähtökantavuuden laskentaan. Lapissa korrelaatio on tulosten suuremmasta hajonnasta huolimatta parempi, koska mitauslämpötilat ovat olleet keskenään vertailukelpoisemmat.

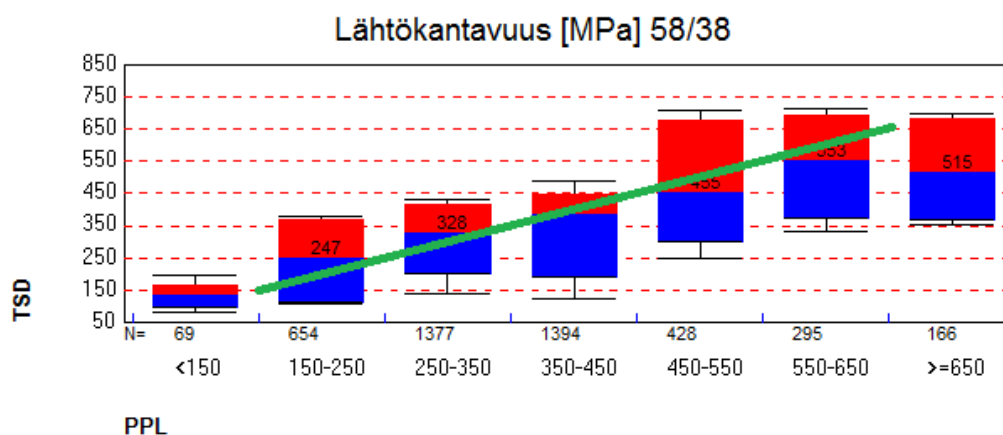
Kiinnostavaa onkin kokeilla, miten forward calculation -menetelmällä määritettyjen rakennekerrosmoduulien käyttö kantavuuslaskennassa vaikuttaa edellä tutkittuun korrelaatioon tiellä 58. Oletuksena on, että menetelmän toimiva lämpötilakorjaus poistaa valtaosan korrelaation vääristymästä.

Pituusleikkauksessa (Kuva 79) aiempien esimerkkien paaluväliltä 2900 – 3900 nähdään kantavuuskuvaajien tasoeron kaventuneen lämpötilakorjauksen ansiosta lähes olemattomaksi. Sekä TSD- että PPL-kuvaajat tunnistavat suurella mittakaavassa samat rakenteen jäykkyysvaihtelut, vaikka TSD-kuvaajassa arvojen hajonta onkin paikoitellen voimakasta. TSD-kuvaajan merkittävät poikkeamat ovat tutkitussa aineistossa kuitenkin luonteeltaan pistemäisiä, jolloin poikkeavat kohdat on helppo havaita.



Kuva 79: *Forward calculation -menetelmällä lasketuista rakennekerrosmoduuleista määritetty lähtökantavuus pohjautuen sekä PPL- että TSD-taipumiin. Esimerkki kantatien 58 tieosalta 38. TSD-tulokset ovat tieosoitteen kasvusuunnasta.*

Havainto PPL- ja TSD-taipumiin perustuvien tulosten samansuuntaisuudesta erottuu hyvin myös tarkasteltujen suureiden tilastollisesta vertailusta. Luokkien mediaaniarvot korreloivat erinomaisesti, joskin TSD-tulosten voimakas vaihtelu näkyy kuvaajassa kohtalaisena arvojen hajontana.

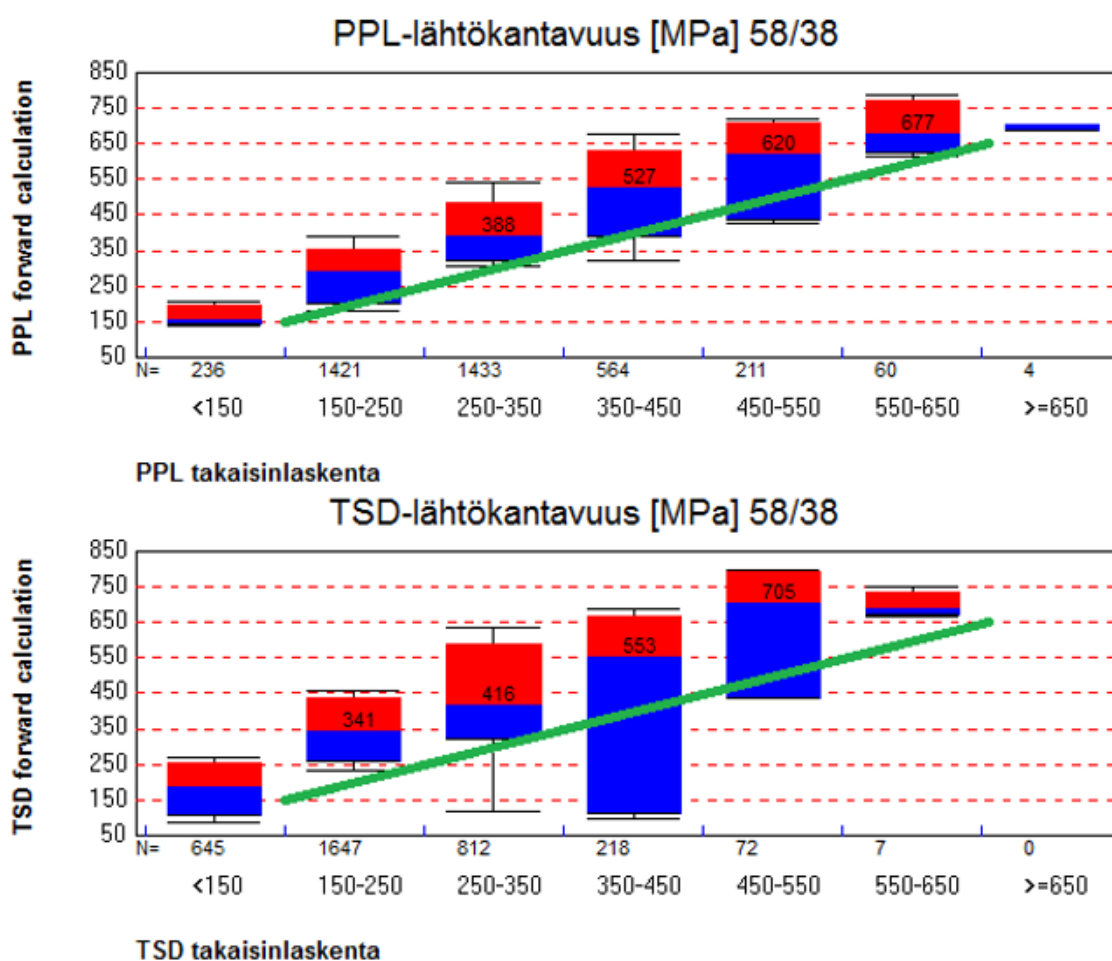


Kuva 80: *TSD- ja PPL-taipumista forward calculation -menetelmällä määritettyjen rakennekerrosmoduulien perusteella laskettujen tavoitekantavuuksien korrelaatio kantatien 58 tieosalla 38.*

Rakennekerrosmoduulien laskenta forward calculation -menetelmällä näyttäisi tuottavan toimivan lämpötilakorjauksen johdosta tässä vertailussa aavistuksen luotettavampia kokotierakenteen kantavuustuloksia kuin kantavuuslaskenta Elmod-ohjelmalla takaisinlasketuista moduuleista. Menetelmänä takaisinlaskenta tuottaa kuitenkin kelvollisia tuloksia, kuten nähdään kantavuusvertailuista (Kuva 81).

Eri tavoin lasketuista rakennekerrosmoduuleista tuotettujen PPL-lähtökantavuuksien yhteys näyttäytyy hyvin suoraviivaisena. Elmodilla määritetyt rakennekerrosmoduulit ovat aavistuksen forward calculation -menetelmän tuottamia pienempiä, minkä vuoksi tietty tasoero heijastuu myös kantavuuslaskentaan.

Myös TSD-taipumista päästään pitkälti samankaltaisiin koko rakenteen kantavuusarvoihin, käytettiinpä rakennekerrosmoduulien määrittämiseen kumpaa menetelmää hyvänsä. Korkean mittauslämpötilan johdosta takaisinlaskennan kautta saatava kantavuus jää kuitenkin alhaisemmaksi kuin forward calculation -menetelmän tai saman tieosan PPL-mittauksen tuottama kantavuus, mikä näkyy selvästi x-akselin alkiodien jakaumassa.



Kuva 81: Pistekohtaiseen ja jatkuvaan taipumamittaukseen perustuvien kantavuustulosten korrelaatio eri menetelmillä lasketuista rakennekerrosten moduuleista.

Yhteenvedona TSD-taipumiin perustuvasta tierakenteen kantavuuden määrittämisestä voidaan todeta kantavuuslaskennan onnistuvan luotettavasti sekä takaisinlaskennan että forward calculation -menetelmien kautta määritettyjen rakennekerrosmoduulien pohjalta edellyttäen, että taipumamittausten olosuhteet eivät poikkea huomattavasti normaalitilasta. Etenkin tierakenteen korkea mittauslämpötila heijastuu korjaamattomana takaisinlaskennan tuloksiin alentaen edelleen myös rakenteen kantavuutta. Niinpä mikäli lasken-

taan käytettäviä taipumia on mittausolosuhteiden johdosta tarpeen korjata lämpötilan suhteen, on lämpötilakorjauksen toimivuudesta laskennan yhteydessä varmistuttava tai vaihtoehtoisesti tehtävä laskenta etukäteen korjatuilla taipumilla.

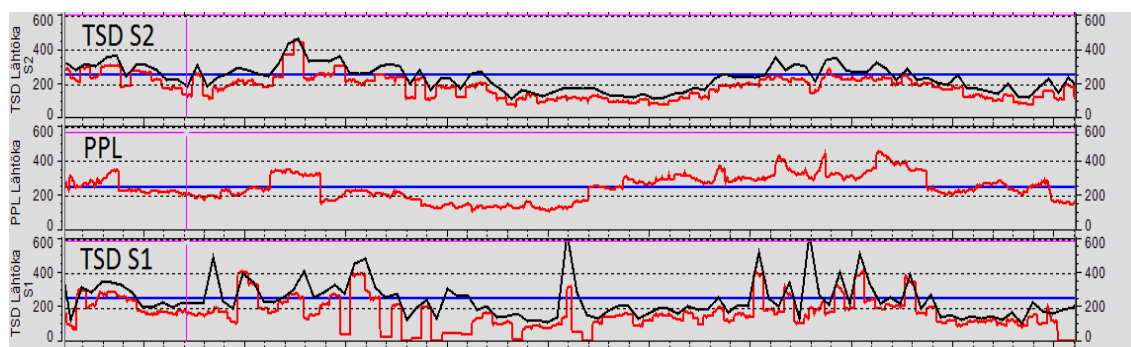
Kantavuusmitoituksen yhteydessä on varmistuttava kallion pinnan asemasta. Kallio liian lähellä pintaa nostaa kantavuusarvon näennäisen hyväksi, mutta liian ohuet rakenteet kallion päällä altistavat materiaaleja hienonemiselle ja johtavat rakenteen nopeaan vaurioitumiseen. Mikäli pohjamaa puolestaan on hyvin pehmeää, ei mitoituksessa tule edes pyrkiä tavoitekantavuuteen vaan rakenteen kuormituskestävyys on varmistettava esimerkiksi teräsverkkojen avulla.

E2-moduuli

Kuten aiemmin kappaleessa 3.4 todettiin, on Suomessa kehitetty E2-moduuli hieman Odemarkin lähtökantavuuden tavoin koko rakenteen pintakantavuutta kuvaava tunnusluku. Tässä yhteydessä onkin kiinnostavaa tarkastella, miten yhdenmukaisesti suoraan kuormitusvasteesta saatava E2-moduuli käyttäytyy rakenteelle lasketun lähtökantavuuden kanssa. E2-moduulin selkeä etu on laskennan helppous ainoastaan taipumamittauksen tulosten perusteella. Näin vapaudutaan kerrospaksuustiedon tarpeesta ja samalla myös monista Odemark-laskentaan liittyvistä rajoitteista ja yksinkertaistuksista. Käytävyyttä lisää edelleen, että TSD-menetelmän myötä E2-profiili on saatavissa jatkuvana.

E2-moduulin puutteena voidaan pitää, että toistaiseksi sitä on käytetty lämpötilakorjaamattomana, ainoastaan ilmaisemassa rakenteen mittaushetkisiä ominaisuuksia. Toisaalta edellä kävi ilmi, ettei lämpötilakorjaus toimi Elmod-laskennassakaan. Yhtä kaikki tulosten laadun parantamiseksi E2-moduulin laskentaan olisi luotava lämpötilakorjaus, mikä ei ole aivan yksiselitteistä. Kuten kaavasta (10) nähdään, käytetään laskennassa kiistatta lämpötilariippuvaista maksimitaipuman arvoa. Lisäksi myös vakiona pidetty Poisson-luku on tarkasti ottaen riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta (Virtala 2016, s. 60 – 61).

Edelläkin esimerkkinä käytetyllä tien 58 tieosalla E2-moduulin ja lasketun lähtökantavuuden vertailu näyttäisi tuottavan hyvin rohkaisevia tuloksia (Kuva 82). Trendi on samanlainen myös tien 924 esimerkkinä käytetyllä tieosalla. Kuvassa punaisella on esitetty Odemark-lähtökantavuus ja mustalla viivalla puolestaan E2-moduuliarvo.



Kuva 82: Rakenteelle lasketun lähtökantavuuden (punainen) sekä E2-moduulin (musta) vertailu kantatien 58 tieosalla 38 paaluvälillä 2900 – 3900.

Tulosten valossa E2-moduuli voisi vastaisuudessa olla käyttökelpoinen ja tehokas työkalu rakenteen kuormituskestävyyden arviointiin. Kannattaa kuitenkin pitää mielessä kantavuuslaskennan lainalaisuudet: käytännön kokemusten perusteella lähellä kallionpintaa laskenta tuottaa liian suuria E2-moduulin arvoja ja vastaavasti erittäin pehmeillä maapohjilla, kuten turpeella E2-arvo jää melko alhaiseksi rakenteesta ja sen paksuudesta riippumatta. Tunnusluvun käyttö vaatiikin kontrollia kallionpinnan ja pohjamaan laadun suhteen.

10. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

PEHKO-projektin kesän 2015 taipumamittaukset laittoivat TSD-menetelmän todelliseen testiin: Suomen pääosin erittäin ohutrakenteisella ja kuormituksen alla dynaamisesti käyttäytyvällä tiestöllä mitattiin huomattavasti suurempia taipumia kuin laajasti Keski-Eurooppaa kiertäneellä IBDiM:n laitteistolla milloinkaan aiemmin. Samalla koeteltiin vakiintuneiden taipuman lämpötilakorjausmenetelmien toimivuutta, kun Keski-Suomen mittauksissa päällysteen pintalämpötila liikkui toistuvasti jopa +30 °C yläpuolella.

Erittäin suurten lämpötilaerojen ja kantatien 77 kohdalla lisäksi varsin poikkeavien rakenteiden vuoksi Keski-Suomen TSD/PPL -vertailumittaukset jäivät alkuperäisen tarkoituksensa kannalta varsin epäedustaviksi. Onneksi Lapin vastaavissa mittauksissa lämpötilaolot olivat vakaammat ja TSD-taipumien PPL-korrelaatio havaittiin selkeästi. Näiden tulosten perusteella TSD:n ja PPL:n tuottamaa taipumatietoa voidaan pitää hyvinkin yhdensuuntaisena ottaen huomioon menetelmien monet eroavaisuudet niin kuormitustapaan ja todellisen kuormittavan voiman suuruuteen kuin kuormitusvasteen rekisteröintiinkin liittyen.

Keski-Suomen vertailumittaukset paljastivat toisaalta taipumien voimakkaan lämpötilariippuvuuden. Ilmiö on pohjoisen sijaintimme asettamien sideainevaatimusten johdosta Suomen tiestöllä huomattavasti merkittävämpi kuin lämpimämmissä maissa, joista TSD:n aiemmat referenssit pääosin ovat. Havainto nostikin esiin lukuisia jatkotutkimustarpeita. Nämä liittyvät niin normalisointimenetelmien kehittämiseen kuin mittauslämpötilan vaikutuksen ulottumiseen rakenteen eri osia kuvaaviin suureisiin mahdollisesti aina BCI-arvoa myöden. Näihin toivottavasti saadaan vastauksia seuraavien laajojen PEHKO-mittauskierrosten yhteydessä vuosina 2020 ja 2025.

Voimakkain lämpötilasensitiivisyys koskee vain kaikkein paksuimpia päällysteitä ja on ongelmallinen nimenomaan taipumatulosten vertailtavuuden kannalta. Samoissa olosuhteissa mitatun jakson sisältä suhteellisesti heikommat ja vahvemmat jaksot erottuvat tuloksissa luotettavasti. Lisäksi PEHKO-aineiston TSD/PPL -vertailussa tasoero on TSD:llä mitattuna turvalliseen suuntaan: esimerkiksi SCI-arvot ja päällysteen venymä ovat TSD-tuloksissa jonkin verran PPL-taipumista laskettuja arvoja suurempia.

Epävarmaa on myös, kumpi menetelmä loppujen lopuksi tuottaa oikeita tuloksia tilanteissa, joissa eroja esiintyy. Käytännön kokemuksen mukaan tiheään tehdyistä PPL-mittauksistakin karkeasti joka viides pudotus on hylättävä (Saarenketo 2016), joten vakiintunut pistekohtainen mittausmenetelmäkään ei ole täysin aukoton. Ainakin PEHKO-aineiston analyysien perusteella TSD-taipumista lasketut kuntoparametrien arvot vastaavat hyvin tierakenteen vaurioita. Esimerkiksi aina kun TSD-taipumista laskettu BCI on korkea, on tiellä havaittu alusrakenteeseen ja pohjamaahan tai kuivatuspuutteisiin linkittyviä ongelmia. Lisäksi TSD:n taipumamuodon ja -nopeuden havaittiin heijastelevan varsin

luotettavasti rakenteen erilaisia ominaisuuksia, kuten kerrospaksuuksia. Vauriodiagnostiikan tarpeisiin ei näistä suureista kuitenkaan löytynyt uusia käyttökelpoisia parametreja.

TSD:n optisesta taipumien rekisteröinnistä johtuen laitteen käyttöön havaittiin liittyvän muutamia rajoitteita. PEHKO-mittausten tuloksista nähdään, miten erittäin avoin ja purkautunut päällyste, auranraapimat sekä mahdollisesti pöly ja hetkellinen kirkas auringonvalo voivat sopivasti lasersäteen tielle osuessaan vaikuttaa tuloksiin siitakin huolimatta, että TSD-taipumat tulostuvat 10 metrin liukuvina keskiarvoina. Tätä tiheämpää tulostusväliä tuskin kannattaa Suomessa käyttää, vaikkakin 10 metrin väli on havaittu liian pitkäksi kohdissa, joissa rakenteen taipumaominaisuudet muuttuvat voimakkaasti. Tällaisia ovat esimerkiksi siirtymäkiilarakenteet.

Myös lähtökantavuuden laskentaa kokeiltiin TSD-taipumista määritettyjen rakennekerrosmoduulien pohjalta. Odemark-mitoitus onnistui TSD-tuloksista siinä missä PPL-taipumistakin, mikä on keskeistä rakenteiden parantamissuunnittelun kannalta. Rakennekerrosmoduulit sitä vastoin ovat spekulatiivisia ohuilla päällysteillä johtuen takaisinlaskentaohjelman rajoitteista. Näissä tapauksissa kunnostustoimet voidaan valita tarkastelemalla SCI-, BCI- ja venymäarvoja, jotka indikoivat, missä rakenteen osassa ongelmia on. Tulevaisuudessa myös lämpötilakorjatun E2-moduulin käyttöä kannattaisi lisätä nopeissa kantavuustarkasteluissa, koska sen laskenta ei edellytä tietoa rakennepaksuuksista, mutta vaatii toisaalta kontrollia kallion pinnan ja pohjamaan laadun suhteen.

Kantavaan kerrokseen asennetun teräsverkon käyttö osoittautui PEHKO-projektinkin kokemusten perusteella erittäin suositeltavaksi heikoilla pohjamailla. Se parantaa rakenteen kykyä jakaa kuormituksia ja vähentää näin pohjamaan ja alusrakenteen deformatiivisuudesta seuraavaa urautumista.

Kaiken kaikkiaan TSD-menetelmän mahdollistama päällystettyjen teiden jatkuvatoiminen taipumamittaus näyttäisi tarjoavan luotettavan kuvan mitattujen teiden rakenteellisesta kunnosta. Tulosten perusteella saadaan jäljitettyä tiestöltä jaksoja, joilla riski liikennekuormituksesta aiheutuvien vaurioiden syntymiselle on suurin. Samalla saadaan tietoa siitä, mikä rakenneosa on vaurioitumisen kannalta kriittisin. Tulevaisuudessa tierakenteiden edelleen ikääntyessä ja yhä raskaampien tavarankuljetusajoneuvojen yleistyessä tämän kaltaisen tiedon tarve tulee mitä luultavimmin lisääntymään.

Tulevia suomalaisen tiestön TSD-mittauksia silmällä pitäen tutkimuksen yhteydessä nousi esiin muutamia suosituksia:

- Suomalaisten teiden taipumamittaukset tulisi ajoittaa siten, että päällysteen pinnasta mitattu lämpötila pysyttelee mittausten aikana välillä $+5 \dots +25$ °C.
- Mittausnopeus mielellään yli 60 km/h. Tätä korkeammilla nopeuksilla taipumamittauksen ja pohjamaan muodonmuutosominaisuuksien (BCI, pohjamaan moduuli) yhteys on suhteellisen lineaarinen, alhaisemmissa nopeuksissa taipumamittaukset ovat pidempiä.
- Mittauslinja tulisi pitää ajourassa kaarteissakin; esimerkiksi päällysteen väsymistä tapahtuu vain ajourien kohdalla.

- TSD-mittausta ei suositella tehtäväksi kaikkein huonokuntoisimmilla, laaja-alaisesti purkautuneilla tai auranraapimilla päällysteillä. Pinnan voimakas epätasaisuus saattaa haitata taipumien optisen rekisteröinnin toimintaa.

LÄHTEET

- Baltzer, S., Pratt, D., Weligamage, J., Adamsen, J. & Hildebrand, G. (2010). Continuous Bearing Capacity Profile of 18,000 km Australian Road Network in 5 Months. verkkodokumentti, 11 p. (haettu: 6.6.2016): ftp://ftp.greenwood.dk/tsd/pdf/tsd_24arrb_paper.pdf
- Dawson, A. & Kolisoja, P. (2004). Permanent Deformation. Report on Task 2.1, verkkodokumentti. Roadex II, 45 p. (haettu 25.1.2016): http://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/01/2_1-Permanent-Deformation_1.pdf
- Flintsch, G., Ferne, B., Diefenderfer, B., Katicha, S., Bryce, J. & Nell, S. (2011). Evaluation of Traffic Speed Continuous Deflection Devices, verkkodokumentti. TRB 2012 Annual Meeting, 17 p. (haettu: 20.1.2016): <http://docs.trb.org/prp/12-1670.pdf>
- Harasim, P. & Sudyka, J. (2014). TSD application in high speed bearing capacity evaluation of road networks, Presentation. Road and Bridge Research Institute. (haettu 4.5.2016): http://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/089_zofka_adam.pdf
- Herronen, T., Matintupa, A. & Saarenketo, T. (2015). Experiences with Integrated Analysis of TSD, GPR and Laser Scanner Data, verkkodokumentti. Roadscanners Oy, 10 p. (haettu: 25.1.2016): http://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/086_herronen_tomi.pdf
- Jenkins, M. (2009). Geometric and Absolute Calibration of the English Highways Agency Traffic Speed Deflectometer, Young Researchers Seminar 2009. Presentation in Torino 3 – 5 June 2009. (haettu: 20.1.2016): [http://www.ectri.org/YRS09/Ppt%20presentations/3_Jenkins_M_Session6_Road%20Transport\(1\)final.pdf](http://www.ectri.org/YRS09/Ppt%20presentations/3_Jenkins_M_Session6_Road%20Transport(1)final.pdf)
- Kalliainen, A., Luomala, H., Jäniskangas, T., Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2011). Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, verkkodokumentti. Liikennevirasto, 152 s. (haettu: 11.2.2016): http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-10_radan_eristys_web.pdf
- Kanerva-Lehto, H. (2009). Teräsverkkojen käyttö tierakenteissa. Tiehallinnon selvitys, verkkodokumentti. Tiehallinto, 78 s. + liit. 12 s. (haettu: 19.4.2016): http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/3201134-v-terasverkkojen_kaytto.pdf
- Kannemeyer, L., Lategan, W. & Mckellar, A. (2014). Verification of Traffic Speed Deflectometer measurements using Instrumented Pavements in South Africa. Pavement Evaluation 2014, Presentation in Blacksburg, Virginia 15 – 18 September 2014. (haettu: 15.7.2016): <http://www.apps.vtti.vt.edu/PDFs/PE-2014/Kannemeyer.pdf>
- Korkiala-Tanttu, L., Kivikoski, H., Rathmayer, H. & Törnqvist, J. (2003). Teräsverkon käyttö tierakenteiden koerakennuskohteissa; synteesi. Tiehallinnon selvitys, verkkodokumentti. Tiehallinto, 41 s. + liit. 13 s. (haettu: 29.8.2016): <http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3200822-vterasverkkayttierak.pdf>

Kurki, T. (1994). Rajoitetun suolan käytön vaikutus asfalttibetonin kulumiseen. Tielaitoksen selvitys, verkkodokumentti. Tiehallinto, 22 s. + liit. 11 s. (haettu 19.2.2016): http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3200255-rajoitetun_suolan_kayt_vaik_asfalttibetonin_kulum.pdf

Maijala, P. (2016). Roadscanners Oy, henkilökohtainen tiedonanto.

Pavement Interactive. (2009). FWD AREA Parameter, verkkosivu. (haettu 26.10.2016): <http://www.pavementinteractive.org/article/fwd-area-parameter/>

Pavement Interactive. (2010). Deflection Based Nondestructive Pavement Analyses, verkkosivu. (haettu 26.10.2016): <http://www.pavementinteractive.org/article/deflection-based-nondestructive-pavement-analyses/>

Pedersen, L., Hjorth, P. & Knudsen, K. (2013). Viscoelastic Modelling og Road Deflections for use with the Traffic Speed Deflectometer, verkkojulkaisu. 97 p. (haettu: 20.1.2016): http://orbit.dtu.dk/files/59481631/phd310_Pedersen_L.pdf

PEHKO-projekti 2015 – 2025. Toimintasuunnitelma. (2015). Roadscanners Oy, verkkodokumentti, 39 s. (haettu: 22.1.2016): <https://sites.google.com/site/pehkoprojekti/toimintasuunnitelma-2015---2021>

Saarenketo, T. (2016). Roadscanners Oy, henkilökohtainen tiedonanto.

Saarenketo, T., Matintupa, A. & Varin, P. (2014) New heavy trucks and their effect on Finnish road condition. Executive Research Summary, verkkodokumentti. Finnish Transport Agency, 28 p. (haettu: 3.3.2016): http://www.nvfnorden.org/library/Files/Utskott-och-tema/Vagens-konstruktion/M%C3%B8ter-og-protokoller/%C3%85rsm%C3%B8der/Stavanger-2014/Saarenketo,%20Heavy%20trucks%20report%20draft_17042014.pdf

Spoof, H. & Petäjä, S. (2000). Pudotuspainolaitemittaus. TPPT-menetelmäkuvaus, verkkodokumentti. VTT, 15 s. + liit. 1 s. (haettu: 20.1.2016): <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/1-pplmittaus.pdf>

Spoof, H. & Petäjä, S. (2000b). Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta. TPPT-menetelmäkuvaus, verkkodokumentti. VTT, 16 s. (haettu: 7.2.2017): <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/2-rakennekerrosmod.pdf>

Sudyka, J. (2016). IBDiM, henkilökohtainen tiedonanto.

Tiehallinto. (2005). Verkkotason taipumamittausten tarveselvitys. Työraportti, verkkodokumentti, 17 s. + liit. 1 s. (haettu: 13.7.2016): http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2016-15_tien_rakenteellisen_web.pdf

Varin, P. & Saarenketo, T. (2014). Effect of Axle and Tyre Configurations on Pavement Durability – a Prestudy, verkkodokumentti. Roadex, 53 p. (haettu: 8.2.2016):

http://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/10/ROA-DEX_Axle_Tyre_Prestudy_15102014%20Final.pdf

Virtala, P. (2016). Tien rakenteellisen kunnon hallinta. Laskennallisen kestävyystarkastelun periaatteet. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, verkkodokumentti. Liikennevirasto, 93 s. + liit. 21 s. (haettu 7.2.2017): http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2016-15_tien_rakenteellisen_web.pdf

Wiman, L. (2001). Accelerated load testing of pavements. HVS-NORDIC tests in Sweden 1999. VTI rapport, verkkodokumentti. VTI, 93 p. (haettu: 6.7.2016): <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:675215/FULLTEXT01.pdf>

Zofka, A. & Sudyka, J. (2015). Traffic Speed Deflectometer (TSD) Measurements for Pavement Evaluation. International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering in Berlin 15 – 17 September 2015. (haettu: 20.1.2016): http://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/089_zofka_adam.pdf

LIITE A: TSD:N JA PPL:N TILASTOLLINEN VERTAILU

